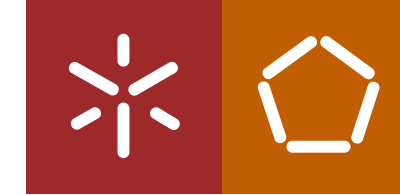


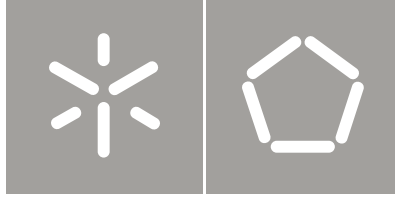


Marco Filipe Barbosa Freitas

Desenvolvimento de Ferramenta de Cálculo
para Dimensionamento de Redes Aeráulicas

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Marco Filipe Barbosa Freitas

Desenvolvimento de Ferramenta de Cálculo para Dimensionamento de Redes Aeráulicas

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia de Mecânica

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor Pedro Alexandre Moreira Lobarinhas

Resumo

Na presente dissertação é desenvolvido uma ferramenta de cálculo para dimensionamento de redes aeráulicas, com base em dois métodos distintos de dimensionamento de condutas.

De uma forma geral, ao longo deste documento encontra-se a informação base para o processo de cálculo, bem como a construção e explicação do uso do programa e, também, cálculo de dimensionamento de uma instalação real.

No segundo e terceiro capítulo, desenvolve-se os conceitos gerais e básicos da Mecânica dos Fluidos essenciais para a automatização do cálculo da ferramenta. Descreve-se diversos tipos de acidentes geométricos presentes numa rede aeráulica, bem como a quantificação das suas perdas de carga, úteis para a construção de uma base de dados acessível a partir do *software*.

No quarto capítulo, apresenta-se uma explicação dos dois métodos utilizados pelo programa: método de redução de velocidade com posterior pressão dinâmica constante (Método 1); método de perda de carga distribuída constante (Método 2). Procede-se à explicação do processo de dimensionamento através dos métodos, bem como à construção e acesso da base de dados das perdas de carga localizadas criadas a partir da obra literária da SMACNA.

Por último, no quinto capítulo, efectuam-se diversas comparações entre vários parâmetros de cálculo como a pressão dinâmica, perda de carga distribuída, perda de carga total, entre outros. Também se compara os valores obtidos teoricamente com os medidos na instalação exemplo. Através de todo esse processo comparativo são, ainda, explicadas e justificadas o tipo de aplicações pelas quais devem recorrer ao método 1 ou ao método 2.

Abstract

The present dissertation is about a developed tool for sizing aerolic networks, based on two distinct methods. In general, this document is provided with all the basic and useful information of Fluid Mechanical to construct the tool for sizing aerolic networks. The rest of this work explain how to use the sizing program, and then with na example of a real instalation are compared the two methods.

In the second and third chapter, it leads to the general and basic concepts of fluid mechanics essential for the automation of the calculation tool. It describes various types of accidents present a geometric network Aeraulics, and to quantify their loss of load, useful for building a database accessible from the software.

At the fourth chapter, there is an explanation of two methods used by the program: a method of speed reduction with subsequent constant dynamic pressure (Method 1), method of constant distributed load loss per meter (Method 2). After this, the process of sizing through the two referred methods is explained, as well the construction and operation of the data base of local friction loss created from the literary work of SMACNA.

Finally, in the fifth chapter, there is some comparisons between various calculation parameters such as dynamic pressure, frictional head loss, total pressure drop, and others. It also compares the values obtained theoretically with those measured in the example installation. Throughout this comparative process are also explained and justified the type of applications which should use method 1 or method 2.

Agradecimentos

A conclusão da dissertação de Mestrado coincide com o fim e o início de uma nova etapa. Até chegar a este ponto e ter concluído o curso de Engenharia Mecânica também necessitei da ajuda do próximo. Por isso, não quero deixar de agradecer a toda a gente que de uma maneira ou de outra me ajudou na dissertação e até no curso em geral.

Acima de tudo, devo agradecer aos meus pais que me permitiram o acesso à Universidade e que me deram sempre o apoio quer emocional quer monetário para aqui chegar. Quero agradecer também aos meus irmãos, cunhada e afilhado Frederico por me dar alegria para enfrentar esta etapa.

Não quero deixar de agradecer o apoio prestado pelo professor e orientador da dissertação Pedro Lobarinhas, bem como a todos os elementos da empresa LUSITAR que me ajudaram na realização da dissertação.

A todos os amigos sem menosprezar os que aqui não coloco o seu nome quero agradecer o apoio dado durante estes anos: ao Tiago por me acompanhar na realização da dissertação visto que também fez a sua na mesma empresa, ao Correia, Otelo, Barbosa, César, Tiago Gonçalves, Ricardo, André, Pedro, Roberto, Bruno, Sandrina, Marlene, Ana, Alexandre, Mário, Hélder, entre outros e o apoio na programação dada pelo Fábio.

Também pretendo agradecer a todos os professores que me instruíram durante estes anos, e a ajuda complementar dada pelo professor Ismael Vaz do departamento de sistemas na elaboração do programa.

Índice

Resumo.....	i
Abstract.....	iii
Agradecimentos.....	v
Índice	vii
Índice de figuras	x
Índice de tabelas	xiii
Índice de Gráficos.....	xiv
Nomenclatura.....	xv
Glossário	xvii
1. Introdução	1
2. Redes aeráulicas	3
2.1. Princípios de Mecânica de Fluidos aplicados a redes aeráulicas	3
2.2. Tipos de escoamento no interior de condutas.....	7
2.2.1. Laminar	8
2.2.2. Turbulento	9
2.3. Tipos de condutas	11
3. Aspectos relativos ao dimensionamento	13
3.1. Acidentes geométricos	13
3.1.1. Curvas.....	13
3.1.2. Derivações.....	15
3.1.3. Transições – alargamentos e reduções.....	17
3.1.4. Unidades de entrada e unidades terminais de ar	19
3.2. Outros componentes/acessórios utilizados em redes aeráulicas.....	21
3.2.1. Tipos de unidades terminais para insuflação	22

3.2.2.	Entradas para retorno e/ou exaustão de ar	28
3.3.	Ventiladores.....	29
3.3.1.	Curva característica e selecção de ventiladores	30
4.	Desenvolvimento de folha cálculo para dimensionamento de redes aerúlicas.....	33
4.1.	Método de redução de velocidade e pressão dinâmica constante.....	34
4.1.1.	Introdução de dados, restrições e obtenção de resultados iniciais	36
4.1.2.	Dimensionamento da conduta principal.....	41
4.1.3.	Dimensionamento de ramais secundários.....	45
4.1.4.	Outras perdas de carga e resultados finais.....	46
4.1.5.	Perda de carga máxima e selecção do ventilador	47
4.2.	Método de perda de carga distribuídas por metro constante	49
4.2.1.	Introdução de dados, restrições e obtenção de resultados iniciais	51
4.2.2.	Dimensionamento da conduta principal.....	51
4.2.3.	Dimensionamento dos ramais secundários.....	52
4.2.4.	Cálculo da perda de carga máxima e selecção do ventilador	52
4.3.	Construção e utilização da base de dados das perdas localizadas	52
5.	Comparação dos métodos desenvolvidos com um caso real.....	55
5.1.	Aplicação do método 1	56
5.1.1.	Introdução de dados e selecção das grelhas de insuflação	56
5.1.2.	Dimensionamento da conduta principal.....	57
5.1.3.	Dimensionamento dos ramais secundários.....	60
5.1.4.	Selecção do Ventilador	61
5.2.	Aplicação do método 2	63
5.2.1.	Introdução de dados e selecção das grelhas de insuflação	63
5.2.2.	Dimensionamento da conduta principal.....	63
5.2.3.	Dimensionamento dos ramais secundários.....	65
5.2.4.	Selecção do ventilador.....	65
5.3.	Comparação entre os métodos 1 e 2	66

5.3.1.	Comparação entre diferentes delimitações de velocidade do método 1	67
5.3.2.	Comparação da pressão dinâmica ao longo da instalação.....	67
5.3.3.	Comparação das perdas de carga distribuídas.....	69
5.3.4.	Comparação entre perdas de carga distribuídas e localizadas	70
5.3.5.	Comparação entre as perdas de carga totais	71
5.3.6.	Comparação com os valores medidos na instalação real.....	72
5.3.7.	Comparação geral entre métodos.....	74
6.	Conclusão	77
6.1.	Possíveis aplicações de cada método.....	77
6.2.	Propostas de trabalho futuro.....	78
7.	Referências bibliográficas.....	79
8.	Bibliografia	81
Anexo A –	Folha de cálculo do Método 1	85
Anexo B –	Folha de cálculo do Método 2.....	87
Anexo C –	Fluxograma do método 1 e do método 2	89

Índice de figuras

Figura 2.1 – Escoamento de um fluido numa tubagem [1]	4
Figura 2.2 - Representação gráfica da equação de Bernoulli [3].....	6
Figura 2.3 - Distribuição de velocidades num escoamento laminar [4]	8
Figura 2.4 - Perfil de velocidades da região de entrada e de escoamento desenvolvido [3]	9
Figura 2.5 – Efeito da rugosidade no regime turbulento numa conduta [3]	10
Figura 2.6 – Diagrama de Moody [3]	11
Figura 2.7 - Conduta em aço galvanizado (A) e tubo spiro (B) [8].....	12
Figura 3.1 - Mudança de direcção do escoamento numa curva [5]	14
Figura 3.2 - Derivação convergente [6].....	16
Figura 3.3 - Derivação divergente [6].....	16
Figura 3.4 - Parâmetros do escoamento em derivações [12]	16
Figura 3.5 - Escoamento em alargamentos e reduções [6]	18
Figura 3.6 - Escoamento nas entradas e saídas de ar das condutas [6]	20
Figura 3.7 - Zona de insuflação sem afectar o bem-estar [7].....	22
Figura 3.8 - Grelha de deflexão simples (A) e grelha de deflexão dupla (B) [8]	23
Figura 3.9 - Grelha de alhetas fixas horizontais [8]	23
Figura 3.10 - Grelha linear de comprimento longo [8].....	23
Figura 3.11 - Tipos de dampers usados em grelhas [9]	24
Figura 3.12 - Tipos de extractores [9].....	24
Figura 3.13 - Difusores Circulares [8].....	25
Figura 3.14 - Difusores quadrados [8].....	25
Figura 3.15 - Difusores perfurados [8].....	25
Figura 3.16 - Difusores de placa [8]	26
Figura 3.17 - Difusores lineares [8]	26
Figura 3.18 - Diferentes formas de dispersão nos difusores rectilíneos ou lineares [8]	26
Figura 3.19 - Difusores rotacionais [8]	27
Figura 3.20 - Difusores multidireccionais [8]	27
Figura 3.21 - Tipos de <i>dampers</i> usados para melhor performance dos difusores [9]	28

Figura 3.22 - Grelha de extracção de lâminas fixas [8].....	28
Figura 3.23 - Grelhas perfuradas e reticuladas [8]	29
Figura 3.24 - Ventilador centrífugo [3]	30
Figura 3.25 - Ponto de funcionamento no gráfico de variação da pressão estática com o caudal de um ventilador [3].....	31
Figura 4.1 - Selecção do método de dimensionamento.....	33
Figura 4.2 - Fluxograma de funcionamento da folha de cálculo.....	34
Figura 4.3 - Selecção do local da instalação da rede aerúlica.....	37
Figura 4.4 – Dados, restrições da rede aerúlica.....	37
Figura 4.5 - Diâmetro de saída do ventilador (não comercial).....	38
Figura 4.6 - Propriedades do ar.....	38
Figura 4.7 - Selecção do material da conduta.....	39
Figura 4.8 - Adicionar ramais para além da conduta principal.....	39
Figura 4.9 - Selecção de grelhas	40
Figura 4.10 - Listagem das grelhas seleccionados.....	40
Figura 4.11 - Selecção de difusores	41
Figura 4.12 - Listagem dos difusores seleccionados	41
Figura 4.13 - Adicionar/Eliminar secções à conduta principal.....	42
Figura 4.14 - Determinação do caudal por secção.....	42
Figura 4.15 - Selecção do diâmetro da conduta.....	43
Figura 4.16 - Velocidade e pressão dinâmica	43
Figura 4.17 - Determinação das perdas de carga	44
Figura 4.18 - Obtenção de resultados em gráficos.....	45
Figura 4.19 - Introdução de dados no dimensionamento dos ramais secundários	45
Figura 4.20 - Perda de carga total do ramal secundário.....	46
Figura 4.21 - Perda de carga e criação/eliminação de secções	46
Figura 4.22 - Perdas de carga de outros equipamentos	47
Figura 4.23 - Formulário para obtenção dos ramais completos.....	48
Figura 4.24 - Obtenção dos pontos das curvas características	49
Figura 4.25 - Exemplo típico de uma rede aerúlica [11].....	50

Figura 4.26 - Determinação do diâmetro e velocidade através das perdas de carga distribuídas.....	51
Figura 4.27 - Formulário inicial da base de dados	53
Figura 4.28 - Perdas de carga localizadas em curvas	54
Figura 4.29 - Formulário para determinação do coeficiente da curva C3	54

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Material de condutas e sua rugosidade [13]	12
Tabela 3.1 - Tipos de curvas utilizadas na construção da base de dados [13]	15
Tabela 3.2 - Tipos de derivações [13]	17
Tabela 3.3 - Tipos de transições [13]	19
Tabela 3.4 – Unidades de entrada e unidades terminais de ar [13]	21
Tabela 4.1 - Velocidade recomendável para evitar pressões sonoras elevadas [10]	37
Tabela 5.1 - Valores mais importantes dos resultados no dimensionamento da conduta principal	58
Tabela 5.2 - Perdas de carga distribuídas na conduta principal.....	58
Tabela 5.3 - Acidentes geométricos na conduta principal e seu coeficiente de perda de carga.....	59
Tabela 5.4 - Perdas de carga localizadas e totais na conduta principal.....	59
Tabela 5.5 - Valores mais importantes dos resultados no dimensionamento do ramal esquerdo.....	60
Tabela 5.6 - Acidentes geométricos no ramal esquerdo e seu coeficiente de perda de carga	60
Tabela 5.7 - Perdas de carga do ramal esquerdo.....	60
Tabela 5.8 - Acidentes geométricos no ramal direito e seu coeficiente de perda de carga.....	61
Tabela 5.9 - Perdas de carga do ramal direito	61
Tabela 5.10 – Valores mais importantes dos resultados no dimensionamento da conduta principal	64
Tabela 5.11 - Acidentes geométricos na conduta principal e seu coeficiente de perda de carga.....	64
Tabela 5.12 - Perdas de carga localizadas e totais na conduta principal.....	65
Tabela 5.13 - Dados obtidos para diferentes velocidades de redução.....	67
Tabela 5.14 - Valores obtidos na instalação real e no método 1.....	73
Tabela 5.15 - Valores obtidos na instalação real e no método 2.....	74

Índice de Gráficos

Gráfico 4.1 - Selecção do ventilador com a pressão estática em função do caudal	49
Gráfico 5.1 - Selecção do ventilador pelo método 1	62
Gráfico 5.2 - Selecção do ventilador	66
Gráfico 5.3 - Variação da pressão dinâmica ao longo da conduta principal (mét.1), para 4 e 10 m/s	68
Gráfico 5.4 - Variação da pressão dinâmica ao longo da conduta principal (mét.2)	68
Gráfico 5.5 - Variação da perda de carga distribuída ao longo da conduta principal (mét.1)	69
Gráfico 5.6 - Variação da perda de carga distribuída ao longo da conduta principal (mét.2)	70
Gráfico 5.7 - Perdas de carga distribuídas e localizadas e sua relação (mét.1)	70
Gráfico 5.8 - Perdas de carga distribuídas e localizadas e sua relação (mét.2)	71
Gráfico 5.9 - Variação das perdas de carga totais pelo método 1	71
Gráfico 5.10 - Variação da perda de carga total no método 2	72
Gráfico 5.11 - Perda de carga total através dos métodos	75

Nomenclatura

Letras	Descrição	Unidades	Constante
A	Área de secção	m ²	
C _f	Coeficiente de perda de carga localizada	-	
D	Diâmetro da conduta	m	
D _{eq}	Diâmetro equivalente da conduta	m	
e	Energia interna	kJ/kg	
f	Factor de atrito	-	
g	Aceleração da gravidade	m/s ²	9,81
h	Entalpia	kJ/kg	
H _d	Altura dinâmica	m.c.ar	
L	Comprimento	m	
\dot{m}	Caudal mássico	kg/s	
p	Pressão estática	Pa	
Pd	Pressão dinâmica	Pa	
Q	Caudal volúmico	m ³ /s	
q	Transferência de calor através da fronteira	kJ/kg	
Re	Número de Reynolds	-	
R	Raio junto à parede da conduta	m	
r	Raio para o qual a velocidade é máxima	m	
U	Velocidade	m/s	
U _f	Velocidade em escoamento laminar	m/s	
W _f	Trabalho de atrito	m ² /s ² = J/kg	
z	Cota - Altura geométrica	m	
ΔH_T	Perda de carga total	m	
ΔH_D	Perda de carga distribuída	m	
ΔH_L	Perda de carga localizada	m	
ΔL	Comprimento total da conduta	m	
Δp	Diferença de pressão estática	Pa	
Δ_{vent}	Pressão exercida pelo ventilador	Pa	
Δz	Diferença de cota	m	

ρ	Massa volúmica	kg/m^3
ε	Rugosidade do material	m
$\frac{\varepsilon}{D}$	Rugosidade relativa	-
ν	Viscosidade cinemática	m^2/s
μ	Viscosidade dinâmica	N.s/m^2

Glossário

Redes aeráulicas – Sistemas de insuflação, extracção ou retorno de ar constituídos por condutas ligadas em série ou em paralelo, para manutenção de ar limpo numa zona ocupacional.

Escoamento estacionário – Os parâmetros envolvidos no escoamento numa determinada secção não variam no tempo.

Diâmetro equivalente – Diâmetro da secção circular equivalente à secção da conduta não circular em que a perda de carga é igual à secção não circular considerada.

Zona de Eddy – Criação de *swirl* originada pela separação das linhas de escoamento que altera o perfil normal de velocidades numa conduta.

Vena contracta – ponto num escoamento de um fluido em que o diâmetro de fluxo é de menores dimensões.

SMACNA - *Sheet Metal and Air Conditioning Contractors National Association*. Apresenta valores experimentais de perdas de carga localizadas de acessórios e condutas.

Visual Basic – linguagem de programação aliada a um conjunto de opções gráficas para uma interface entre utilizador/computador facilitada. Programa integrado no *Excel*.

1. Introdução

A presença de ar limpo num ambiente ocupacional é essencial como fonte de oxigénio para o metabolismo do ser humano. A ventilação natural pode ser insuficiente para garantir estas condições exigidas pelo nosso organismo. Assim, a ventilação mecânica pelo uso de redes aeráulicas são fundamentais para manter os locais habitados por nós com presença de ar limpo, humidade e temperatura aceitáveis.

Para garantir a qualidade do ar, é necessário proceder-se à extracção do ar poluído, em caso de processos e operações que emitem poluentes, ou então por insuflação de ar novo exterior tratado, caso se pretenda obter condições de conforto. O processo de renovação do ar é garantido por intermédio de insuflação/extracção de ar.

O dimensionamento deste tipo de redes é um processo moroso e de difícil execução, pois o seu cálculo manual revela-se extremamente trabalhoso. A adopção de métodos de dimensionamento resolvidos por intermédio de uma folha de cálculo, recorrendo a algoritmos para automatização do processo recomenda-se, de forma a reduzir tempos de projecto e melhoria da optimização dos resultados.

A finalidade deste trabalho surgiu com base numa necessidade de uma empresa do ramo da ventilação (LUSITAR). O seu objectivo é a automatização do processo de dimensionamento introduzindo rotinas no *Microsoft Excel* que possibilite um procedimento mais rápido e uma melhor optimização dos recursos utilizados. O problema base consiste em partir do caudal e das propriedades do ar a transportar e, considerando as características geométricas das condutas e de todos os componentes utilizados no tratamento do ar, determinar a perda de carga total que deverá ser vencida para que o transporte possa ser assegurado. A referida optimização do dimensionamento será apoiada com a construção de uma base de dados, a partir da literatura do SMACNA, com as perdas de carga dos acidentes geométricos típicos em instalações aeráulicas. A algoritmia tem um papel importante para que o acesso a uma base de dados seja mais rápida e eficiente. Para isso, o uso de uma ferramenta capaz de introduzir diversas rotinas torna-se essencial. Como o *Excel* apresenta acoplado um suplemento designado por *Visual Basic*, optou-se pela sua utilização para maior facilidade de acesso por parte da empresa a todo o programa.

2. Redes aeráulicas

As redes aeráulicas abordadas nesta dissertação são relativas a processos de insuflação, exaustão e retorno de ar para garantir a qualidade do ar interior. Podem ser utilizadas para extracção de ar poluído, de forma a prevenir danos à saúde, garantir segurança e bem-estar dos trabalhadores, para manutenção do conforto e produtividade do indivíduo e até para conservação de materiais e equipamentos.

O correcto dimensionamento das redes aeráulicas é muito importante, pois deverá garantir diversos parâmetros: obtenção do bem-estar das pessoas; correcta utilização de tecnologia que irá garantir a circulação forçada de ar; preço da instalação, manutenção e utilização; satisfação do cliente; eficiência do sistema. Todos estes objectivos serão mais facilmente atingidos recorrendo-se à utilização de programas capazes de tornar o processo de dimensionamento mais rápido, eficiente e automatizado. A introdução de algoritmos através das equações básicas da Mecânica dos Fluidos, a inclusão de restrições ao método de dimensionamento e a própria facilidade de manuseamento do *software*, tornarão os resultados obtidos mais concisos com o esperado pelo cliente e pelo engenheiro.

2.1. Princípios de Mecânica de Fluidos aplicados a redes aeráulicas

O escoamento nas redes aeráulicas pode ser estudado através das diversas leis que estão presentes na Mecânica dos Fluidos, em que se destacam as equações de energia, a consequente equação de Bernoulli e a equação da continuidade.

No escoamento de um fluido real, ou seja, com atrito viscoso e transferência de calor pelas paredes de um tubo de corrente, é necessário trabalho para que o fluido circule no seu interior. Antes de conhecer os parâmetros importantes no estudo do movimento de fluido, deve-se enunciar quais as bases inerentes ao escoamento real (Dinâmica de Fluidos). A quantidade de fluido por unidade de tempo que atravessa uma qualquer área de secção designa-se caudal, e pode ser expresso por volume (m^3/s) ou por massa (kg/s). O caudal volúmico pode ser calculado através do produto da área de passagem pela velocidade média (equação 1), já que o perfil de velocidades na conduta é parabólico [1]. Por conseguinte, o caudal mássico pode ser obtido pelo produto do caudal volúmico pela massa volúmica do fluido (equação 2).

$$Q = U \cdot A \quad (1)$$

$$\dot{m} = \rho \cdot U \cdot A \quad (2)$$

Numa superfície de controlo fixa (Figura 2.1), o caudal mássico de entrada na secção 1 impele o fluido que se encontra à sua frente num intervalo de tempo (dt), até à secção 2. Os caudais mássicos, quer na secção 1, quer na secção 2, para escoamentos permanentes são iguais [1]. Deste modo, pode definir-se a equação da continuidade do escoamento. Se o escoamento for incompressível, o caudal volúmico será constante. O trabalho de escoamento é traduzido pela equação 3, na qual a pressão exercida sobre a área de secção do tubo de corrente origina uma força ao longo do espaço percorrido, que é definido pela velocidade de escoamento no intervalo de tempo (dt), originando trabalho que garante o escoamento [2].

$$p_2 \cdot A_2 \cdot U_2 \cdot dt - p_1 \cdot A_1 \cdot U_1 \cdot dt = \left(\frac{p_2}{\rho_2} - \frac{p_1}{\rho_1} \right) dm \quad (3)$$

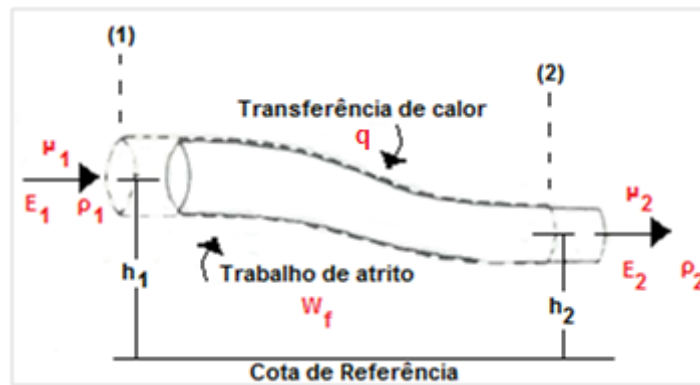


Figura 2.1 – Escoamento de um fluido numa tubagem [1]

A equação geral de energia envolve diversos parâmetros como a energia interna, energia cinética e a potencial. Para além do trabalho de escoamento, deve ser considerado o trabalho de atrito (W_f) que se define como o trabalho necessário para que o escoamento vença as forças de atrito (viscosas e cinéticas). Na Figura 2.1, também está representada a transferência de calor (q) através da fronteira, do ambiente para o interior do fluido. Definidos todos os tipos de energia dispostos em jogo, é possível apresentar o princípio de conservação da energia, por unidade de massa (equação 4), como sendo [2]:

<p><i>Ganho de energia total entre as secções 1 e 2</i></p> <p><i>= calor recebido – trabalho fornecido pelo fluido</i></p>

$$(e_2 - e_1) + \left(\frac{U_2^2 - U_1^2}{2} \right) + g(z_2 - z_1) = q - w_f - \left(\frac{p_2}{\rho_2} - \frac{p_1}{\rho_1} \right) \quad (4)$$

Como a entalpia é definida pela equação 5, então, a equação da energia pode ser descrita como se encontra na equação 6.

$$h = e + \frac{p}{\rho} \quad (5)$$

$$h_1 + \frac{U_1^2}{2} + gz_1 + q - w_f = h_2 + \frac{U_2^2}{2} + gz_2 \quad (6)$$

Estabelecida a equação da energia de escoamento (equação 6), a equação de Bernoulli é de simples obtenção, pois é um caso particular da equação anterior [2]. Considerando que o fluido é invíscido ($W_f=0$) e incompressível (p é constante), que o regime de escoamento é estacionário e não ocorrem trocas de calor através da fronteira ($q=0$), obtém-se a equação de Bernoulli da qual se pode avaliar através de duas formas de representação:

- i. Multiplicando ambos os membros pela massa volúmica (ρ), obtém-se a equação 7, sendo que cada termo apresenta as dimensões em Pascal:

$$p_1 + \rho \frac{U_1^2}{2} + \rho gz_1 = p_2 + \rho \frac{U_2^2}{2} + \rho gz_2 = cte \quad (7)$$

- ii. Dividindo ambos os membros da equação da energia pela aceleração da gravidade, obtém-se a equação 8, a qual cada termo apresenta as dimensões de comprimento:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g} + z_2 = cte \quad (8)$$

Os três termos das equações 7 e 8 podem ser entendidos de forma diferente. O primeiro termo designa-se por piezométrico e representa a energia devida à pressão estática (p_1 na equação 7). Pela forma da equação 8, já com unidades de comprimento, o termo designa-se por altura piezométrica ou altura de pressão. A pressão estática refere-se à pressão que qualquer observador que se desloque solidário com o fluido observará e representa, no caso de redes aeráulicas, a pressão exercida pela concentração de moléculas de ar.

O termo cinético (pressão dinâmica) é o segundo termo da equação 7 e representa a energia correspondente ao movimento, ou seja, a energia cinética do escoamento por unidade de volume. Pela equação 8, representa a altura cinética devida à pressão dinâmica.

Por fim, o terceiro termo da equação 7 designa-se por cota e corresponde à energia potencial por unidade de volume. Na forma da equação 8, representa a altura potencial ou cota e é referente à posição geométrica na instalação. A pressão gerada pela cota designa-se por pressão hidrostática que indica as variações de pressão devido às variações de energia potencial do fluido. Da soma dos termos estático e cota, obtém-se a linha piezométrica (Figura 2.2).

Da soma das três componentes da equação 7, pressão estática, pressão dinâmica e pressão hidrostática, resulta a pressão total. Na forma da equação 8, os três termos (altura de pressão, cinética e potencial) representam a altura de carga total.

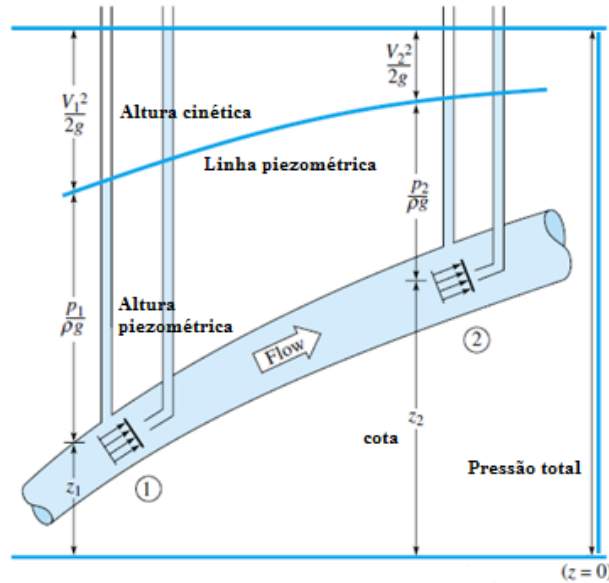


Figura 2.2 - Representação gráfica da equação de Bernoulli [3]

Uma forma fácil de interpretação da equação de Bernoulli encontra-se representada na Figura 2.2. A colocação de um tubo de Pitot estático, permite o conhecimento da pressão estática mais a hidrostática (linha piezométrica). A introdução do tubo paralelamente ao escoamento, acaba por fazer com que na entrada a velocidade seja nula, permitindo obter-se a linha de energia, ou seja, a pressão de estagnação. A partir da diferença entre a pressão total e a soma da altura piezométrica e da cota obtém-se a altura cinética.

Num escoamento real a equação de Bernoulli pode ser aplicada, bastando para isso considerar o trabalho de atrito. Este é referente à altura de energia de perdas, ou perdas de carga entre as secções 1 e 2 (equação 9).

$$\Delta H = \frac{W_f}{g} = \frac{\Delta p}{\rho g} + \Delta z \quad (9)$$

Existem dois tipos de perda de carga: distribuídas e localizadas. As perdas de carga distribuídas referem-se ao atrito viscoso, ou seja, é devida à viscosidade e fricção entre as partículas do fluido e destas com a parede interna do tubo e são calculadas pela equação 10, em que f é o factor de atrito e que será definido no capítulo 2.2.

$$\Delta H_D = f \frac{L U^2}{D 2g} \quad (10)$$

Relativamente às perdas de carga localizadas, estas ocorrem quando existe qualquer variação na conduta direita, como as curvas, tês, bifurcações, reduções e ampliações, entrada e saída da conduta, entre outros. O seu cálculo pode ser realizado por dois métodos. O primeiro consiste em cada acidente na conduta aplicar um comprimento equivalente que depois é somado ao comprimento da conduta, como se de uma perda de carga distribuída se tratasse. O segundo método, lido em tabelas de fabricantes, é o método dos coeficientes que consiste em multiplicar um coeficiente (C) ou vários, dependendo do número de alterações à conduta direita (na equação 11 é representado pela letra i) pela altura cinética, obtendo-se a perda de carga do acessório (equação 11).

$$\Delta H_L = \sum_1^i C_i \frac{U_i^2}{2g} \quad (11)$$

Estabelecidos os dois tipos de perda de carga, pode definir-se a perda de carga total de acordo com a equação 12. De salientar que o parâmetro ΔL refere-se ao comprimento total da conduta incluindo todos os acidentes geométricos.

$$\Delta H_T = \Delta H_D + \Delta H_L = \frac{U^2}{2g} \left(\frac{f \Delta L}{d} + \sum_i k_i \right) \quad (12)$$

Assim, numa rede de condutas, estas perdas têm que ser vencidas, que no caso de redes aeráulicas esse trabalho é realizado pelos ventiladores. A equação 10, representa a equação de Bernoulli generalizada, com a adição do termo da carga adicionada pelo ventilador. Neste caso, o termo é positivo pois permite o aumento de pressão.

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g} + z_2 - \Delta H_T + \Delta H_{vent} \quad (13)$$

2.2. Tipos de escoamento no interior de condutas

A natureza do escoamento é relevante para o dimensionamento, pois dependendo do regime seja laminar ou turbulento, as perdas de carga serão diferentes.

A caracterização e demonstração da existência de dois tipos de escoamentos foram verificadas e comprovadas por Reynolds. Na sua experiência, verificou que ao introduzir um jacto de um líquido colorido no seio da água num tubo de vidro para baixas velocidades de escoamento, o jacto de tinta não se misturava com o escoamento principal, designando o escoamento como laminar. Porém, aumentando o caudal e, consequentemente, a velocidade de escoamento principal (para a mesma área de secção do tubo), verificou

que o fio de tinta distorceu-se e misturou-se com o fluido principal. Este tipo de escoamento designou-o de turbulento e para a gama mal delimitada entre um escoamento e outro, denominou de zona de transição [2].

Assim, Reynolds definiu um parâmetro adimensional que define o regime a que o escoamento se encontra através de uma relação entre as forças de inércia e as de viscosidade. Esse parâmetro designa-se por número de Reynolds (equação 14).

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (14)$$

Para tubagens lisas, o fim do regime laminar ocorre para um Re de 2100. Entre 2100 e 3000, surge a zona crítica e, a partir deste último valor, surge uma zona de transição até um Reynolds de 10000, no qual a partir daí ocorre o regime turbulento.

2.2.1. Laminar

Num tubo longo e recto, em regiões longe da entrada e que apresentem um escoamento plenamente desenvolvido, a distribuição de velocidades na secção transversal é parabólica (Figura 2.3) e pode ser traduzida pela equação 15. Para o dimensionamento utiliza-se a velocidade média, já que a velocidade não é constante ao longo de uma secção da conduta.

$$U_r = \frac{\Delta p}{2\mu L} (R^2 - r^2) \quad (15)$$



Figura 2.3 - Distribuição de velocidades num escoamento laminar [4]

A perda de carga é proporcional à velocidade média do escoamento e ao inverso do quadrado do diâmetro da conduta. O coeficiente de perda de carga, f , para um escoamento laminar rege-se pela equação 16, e está representada no diagrama de *Moody*, pois apesar de esta equação ter sido obtida para condutas de parede lisa, pode ser utilizada para paredes rugosas, pois a diferença de valores é desprezável.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (16)$$

Todas estas equações apenas podem ser aplicadas para escoamentos laminares. Ao convergir para o interior da conduta o fluido apresenta, na secção transversal, um perfil de velocidades sensivelmente uniforme, pois comporta-se praticamente como invíscido. Com o avanço do fluido na conduta, o efeito da viscosidade induzido pelas paredes da conduta aumenta e o efeito invíscido vai diminuindo. Na Figura 2.4, as linhas a tracejado no interior da conduta são relativas à camada limite, cuja sua espessura aumenta com o aumento do efeito da viscosidade. Como a zona central do fluido deixa a partir de um certo ponto de ser afectada pela viscosidade, a velocidade de escoamento será maior nessa zona, obtendo-se um escoamento completamente desenvolvido, com um regime de velocidade parabólico. A velocidade à entrada é igual à velocidade média desse regime parabólico.

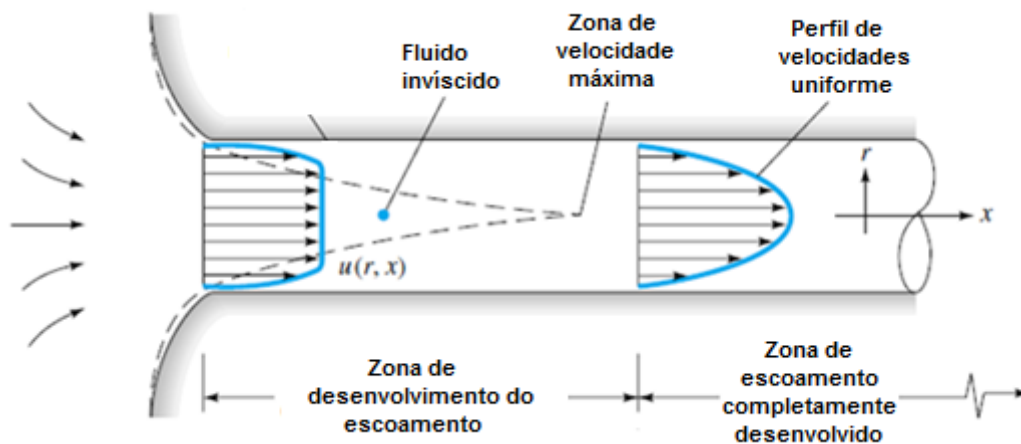


Figura 2.4 - Perfil de velocidades da região de entrada e de escoamento desenvolvido [3]

2.2.2. Turbulento

Em escoamento turbulento já não faz sentido falar em condutas de parede lisa, pois todas as expressões utilizadas não fazem qualquer tipo de referência à eventual presença de rugosidade. Contudo, foram sendo propostas algumas equações para obtenção do factor de atrito. Prandtl, obteve a equação 17 enquanto H.Blasius obteve uma equação de mais fácil resolução, para valores de Reynolds até 10^5 (equação 18) [3].

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(Re \sqrt{f}) - 0,8 \quad (17)$$

$$f = 0,316 Re^{(-\frac{1}{4})} \quad (18)$$

No que concerne ao regime laminar, o fluido tende a preencher as irregularidades devidas à rugosidade a conduta, criando sobre elas uma camada regular, o que faz com que as equações possam ser

na mesma aplicáveis. Para um regime turbulento, esta simplificação já não deve ser efectuada. Nikuradse, em laboratório, fez a comparação entre as equações 16, 17 e 18. No escoamento laminar, denotou que as diferenças entre a equação 16 e os seus resultados eram negligenciáveis. Mas em relação às outras equações o mesmo já não acontece. Segundo as equações 17 e 18, o factor de atrito teria que diminuir com o aumento do número de Reynolds, mas com o facto da rugosidade passa-se o contrário [3]. Quanto maior o rácio entre a rugosidade e o diâmetro do tubo, maior será o factor de atrito, até que a partir de certa altura se torna mais ou menos constante. Na Figura 2.5, repare-se na correlação por ele efectuada (zona com pontos) e as equações 17 e 18 a tracejado.

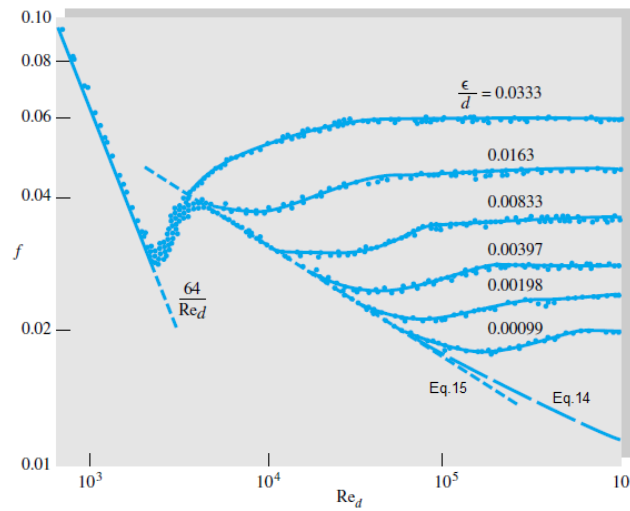


Figura 2.5 – Efeito da rugosidade no regime turbulento numa conduta [3]

Com isto, foram sendo obtidas equações que permitem o cálculo do factor de atrito tendo em conta a rugosidade da conduta. Segundo Colebrook, o factor de atrito pode ser obtido pela equação 19, mas o cálculo de f , torna-se mais complexo, pois na fórmula de forma implícita, sendo necessário efectuar iterações para o seu cálculo [3].

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\frac{\epsilon}{D}}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (19)$$

A final e aceite, foi proposta por Haaland (1983), em que o factor de atrito surge na forma explícita (equação 20) [3].

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \log_{10} \left[\frac{6,9}{Re_D} + \left(\frac{\frac{\epsilon}{d}}{3,7} \right)^{1,11} \right] \quad (20)$$

As expressões que traduzem o factor de atrito estão representadas sob a forma gráfica no diagrama de Moody (Figura 2.6). A região a sombreado representa a zona de transição entre o escoamento laminar e

turbulento. O seu escoamento tem características alternadamente laminares e turbulentas. Dependendo da taxa de produção de turbilhões, da geometria e da rugosidade da conduta e das perturbações na entrada do escoamento, a gama de valores do número de Reynolds, na zona de transição, pode ser muito extensa (até 10000). Neste trabalho a equação 20 será aplicada para a região crítica (Figura 2.6), transição e turbulenta.

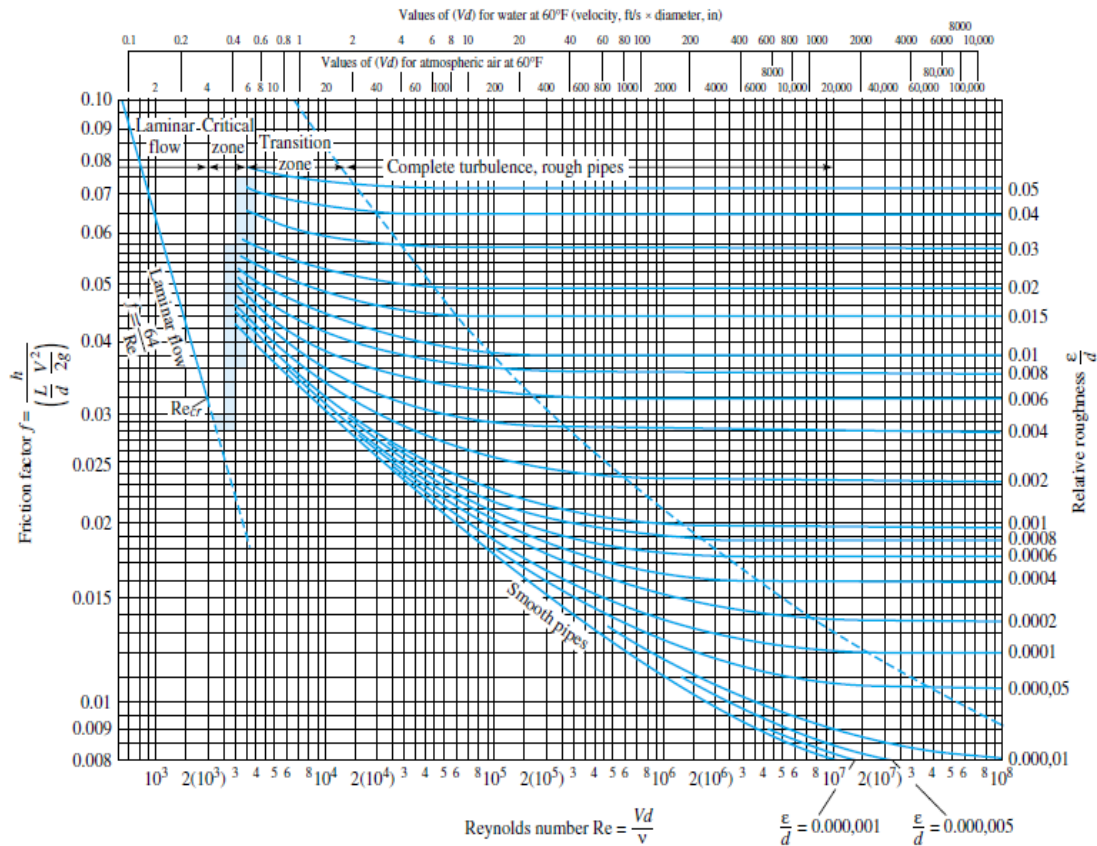


Figura 2.6 – Diagrama de Moody [3]

2.3. Tipos de condutas

As condutas de condução de ar, poeiras ou fumos devem ser construídas com base em características essenciais como uma estrutura robusta, baixa complexidade de instalação, peso reduzido, menor vulnerabilidade possível à corrosão, entre outros.

No ramo aeráulico, muitas das condutas não são de secção circular, mas sim de secção rectangular. Sendo assim, surge um problema na definição do diâmetro para calcular as perdas de carga distribuídas. Para contornar o problema pode efectuar-se uma aproximação em comparação com as condutas circulares. Para isso, utiliza-se a equação 21 que permite calcular o diâmetro da conduta de secção recta cuja perda de carga e caudal é semelhante se fosse uma conduta circular.

$$D_{eq} = 1,3 * \left(\frac{(A * B)^5}{(A + B)^2} \right)^{(1/8)} \quad (21)$$

Uma das características importantes numa conduta, é a rugosidade do material. Numa rede aeráulica, normalmente, encontra-se condutas fabricadas em chapa de inox, chapa galvanizada (Figura 2.7 - A) e até em alumínio. Também se usa muito o designado “tubo spiro” (Figura 2.7 - B) em aço galvanizado ou inox, fabricado com costuras em espiral, tornando o mesmo mais robusto e tornando-o mais estanque reduzindo consideravelmente a propagação do ruído. Tem a vantagem de ser de baixo custo e apresenta uma maior rapidez/facilidade de montagem.



Figura 2.7 - Conduta em aço galvanizado (A) e tubo spiro (B) [8]

A Tabela 2.1 indica a rugosidade de cada um destes materiais, que é útil ao cálculo das perdas de carga distribuídas.

Tabela 2.1 - Material de condutas e sua rugosidade [13]

Material	Rugosidade (ϵ) - mm
Aço inox	0,046
Aço galvanizado	0,15
Alumínio	0,002

3. Aspectos relativos ao dimensionamento

Conhecidas todas as teorias e equações básicas da Mecânica dos Fluidos, deve-se explorar todo o tipo de componentes que fazem parte de uma rede aeráulica. Todas as suas funções e utilidades devem ser conhecidas para o correcto dimensionamento. Esses componentes podem ser acidentes geométricos para alteração do percurso linear da conduta, grelhas e difusores para insuflação e/ou extracção de ar, ventiladores, entre outros.

3.1. Acidentes geométricos

Todos os dados relativamente ao valor do coeficiente de perda de carga C_{it} , podem ser encontrados na base de dados ASHRAE *Duct Fitting Database*, ou então na base de dados da SMACNA que foi especialmente concebida para redes aeráulicas. Como a documentação da ASHRAE encontrasse bastante desactualizada, será utilizada a base de dados da SMACNA. Esta base de dados contém valores relativos aos acidentes geométricos seguintes: curvas, transições, derivações e entradas e unidades terminais de ar.

3.1.1. Curvas

Uma curva inserida numa secção de conduta, induz uma perda de carga muito maior do que a mesma secção de conduta sem a curva. Nas redes aeráulicas podem-se encontrar curvas de 90° , 45° , 30° , em secções circulares ou rectangulares.

A maior perda de carga é devida à mudança de direcção do fluxo do fluido. Ocorre a separação do fluxo com as paredes e forma-se um fluxo secundário, que cria rotação ao fluido, decorrente do aumento da aceleração centrípeta [3].

Pela Figura 3.1, na linha recta da conduta o perfil de velocidades (U_1) e de pressão é uniforme. Contudo, quando o fluido atravessa o acidente geométrico, esses perfis alteram-se. Na zona interna da conduta a velocidade aumenta e a pressão diminui, enquanto que nas zonas *AB* e *CE* (designadas por zona de *Eddy*), ocorre precisamente o inverso, criando um *swirl*, que altera o perfil de velocidades segundo U_2 . Depois de ultrapassado o acidente geométrico, o perfil de velocidade tende a uniformizar-se (U_3) [5].

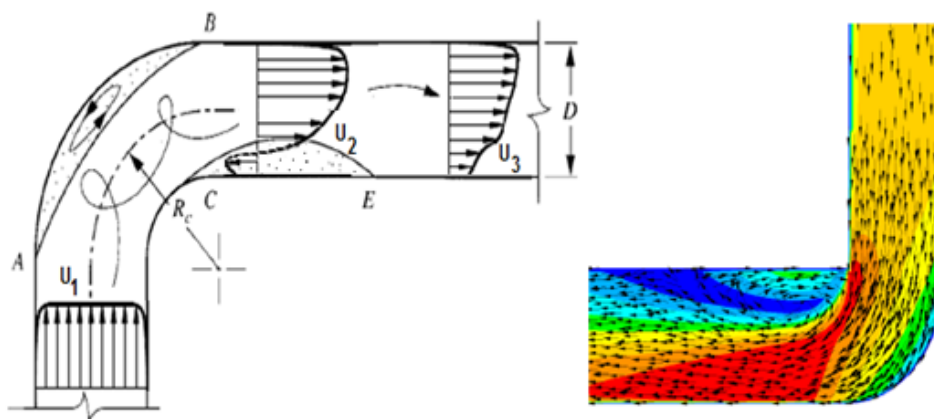


Figura 3.1 - Mudança de direcção do escoamento numa curva [5]

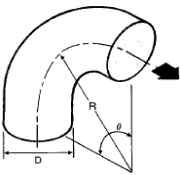
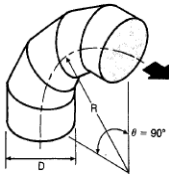
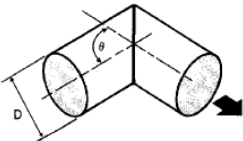
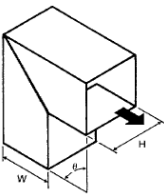
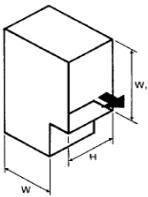
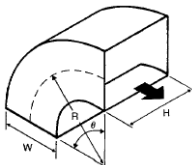
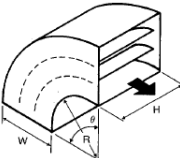
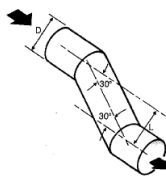
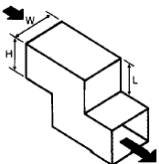
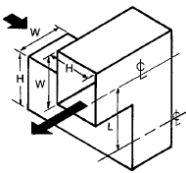
A magnitude do factor de atrito é influenciada por diversos factores [5]:

1. Rácio entre o raio de curvatura e o diâmetro da curva (D);
2. Em caso de curvas construídas por gomos, quantos mais foram utilizados no seu fabrico menor será a perda de carga;
3. A colocação de palhetas divisoras (*splitter vanes*) em condutas rectangulares, reduz a turbulência e a criação das zonas de *Eddy*;
4. Forma da área transversal da conduta.

A maior influência em termos de perdas de carga é devida ao raio de curvatura ao centro da conduta. Quanto maior o raio menor será a perda de carga, contudo esta vantagem traduz-se em alguns inconvenientes, como a maior quantidade de material para fabrico da conduta, preço de fabrico mais elevado e também torna-se necessário mais espaço para a sua alocação no espaço pretendido e confinado. As curvas das condutas rectangulares são propícias a maiores perdas de carga, pois as paredes são conectadas entre si perpendicularmente, criando vórtices de maior intensidade.

Na Tabela 3.1 estão apresentados todos os tipos de curvas utilizadas na criação da base de dados de perdas de carga localizadas.

Tabela 3.1 - Tipos de curvas utilizadas na construção da base de dados [13]

	Curva cilíndrica lisa com ângulo entre a entrada e saída (θ) de 90°, 45°, 30°, entre outros.		Curva cilíndrica por gomos com ângulo (θ) de 90°, 45°, 30°, entre outros e construída por vários gomos.
	Curva cilíndrica com junta de esquadria, podendo o ângulo de esquadria (θ) ser de vários valores.		Curva rectangular com junta de esquadria, podendo o ângulo (θ) de esquadria ser de vários valores.
	Curva rectangular com junta de esquadria e com fluxo convergente ou divergente.		Curva rectangular com raio de curvatura (R) e ângulo de entrada e saída (θ) de vários valores.
	Curva rectangular com raio de curvatura (R) e ângulo de entrada e saída (θ) de vários valores, com palhetas divisoras.		Curva cilíndrica de 30° com as três partes em linha recta, mas cada uma com a linha média diferente.
	Curva rectangular de 90° em forma de Z.		Curva de 90° rectangular em planos diferentes.

3.1.2. Derivações

Nas redes aeráulicas é muitas vezes necessário recorrer a derivações para direccionar ar para vários compartimentos ou para extraí-lo de vários locais através de uma conduta comum. Assim, existem dois tipos de derivações de acordo com o sentido do fluxo: convergentes (mistura do fluido) e divergentes (separação do

fluido). Um ramo de conduta que combina ou diverge com a conduta principal num ângulo de 90° , é designado por “Tê” (*TEE*). Contudo, se este ângulo varia entre os 15° e 75° é chamado de “forquilha” (*wyel*) [12]. Ambos podem apresentar uma secção circular, oval ou rectangular.

O valor do coeficiente de perda de carga depende da geometria dos ramos principal e secundário, do rácio de caudal entre a entrada e saída do fluido e do regime do fluxo. Durante o escoamento, quer a separação quer a junção do fluido cria instabilidades no fluxo, tornando-o mais turbulento entre os fluxos e junto das paredes internas quer à entrada quer à saída do ramo secundário (Figura 3.2 e Figura 3.3). A maior perda de carga devido a maiores instabilidades do fluxo ocorre em derivações divergentes.

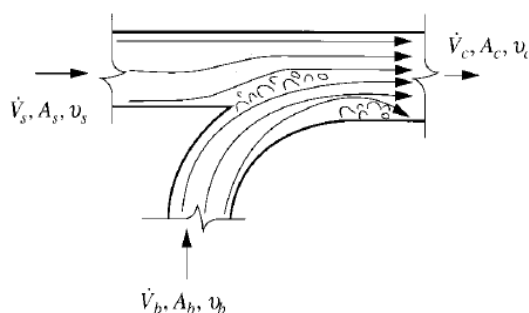


Figura 3.2 - Derivação convergente [6]

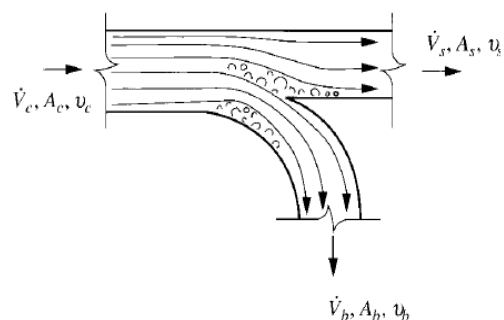


Figura 3.3 - Derivação divergente [6]

Para o cálculo do coeficiente de perda de carga é necessário calcular dois valores de C . Na Figura 3.4 é indicado o sentido de fluxo das derivações convergentes (com setas a negrito) e das derivações divergentes (com setas mais claras). Através do SMACNA será necessário, para além de saber a direcção do fluxo de ar, determinar os diâmetros e respectivas áreas. O ângulo entre a conduta principal e o ramal, e o caudal em cada uma das três zonas da derivação (Q1, Q2 e Q3) também devem ser conhecidas para determinação do valor de C . Algumas das derivações, quer divergentes, quer convergentes utilizadas na construção da base de dados encontram-se na Tabela 3.2.

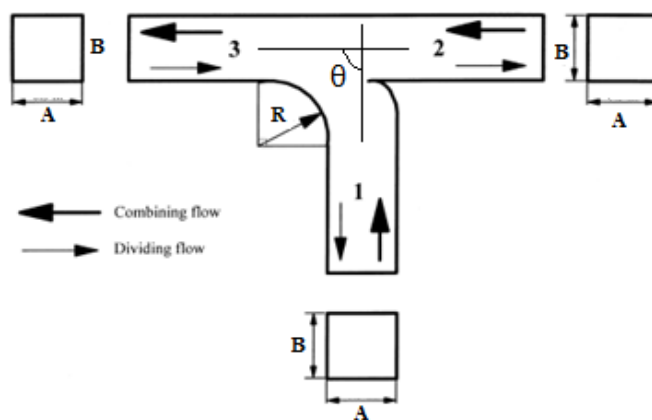


Figura 3.4 - Parâmetros do escoamento em derivações [12]

Tabela 3.2 - Tipos de derivações [13]

	Tê convergente/divergente de secção rectangular para ramo principal e secundário, 90°.		Tê convergente/convergente de secção circular para os dois ramos.
	Tê convergente/divergente de 90°, com ramo principal rectangular e ramo secundário circular.		Forquilha convergente/divergente, secção circular e ângulo entre ramos de 45°. Pode ter outros ângulos.
	Forquilha convergente, cônica, de secção circular, 45°.		Tê divergente cônico no ramal secundário de 45°, com secção circular.
	Derivação em forma de Y, de secção rectangular, 90° entre os ramos curvos.		Derivação em forma de Y, de secção circular, com diferentes ângulos entre os ramos rectilíneos.
	Tê divergente de secção circular, com curva de 45° e ramal secundário a 90° do ramal principal.		Tê divergente cônico no ramal secundário de 90°, com secção circular.

3.1.3. Transições – alargamentos e reduções

Sempre que um fluido atravessa um acidente geométrico de redução ou aumento do diâmetro da conduta, ocorre a separação das linhas de escoamento formando-se zonas de Eddy (aumento do *swirl*) e elevada turbulência.

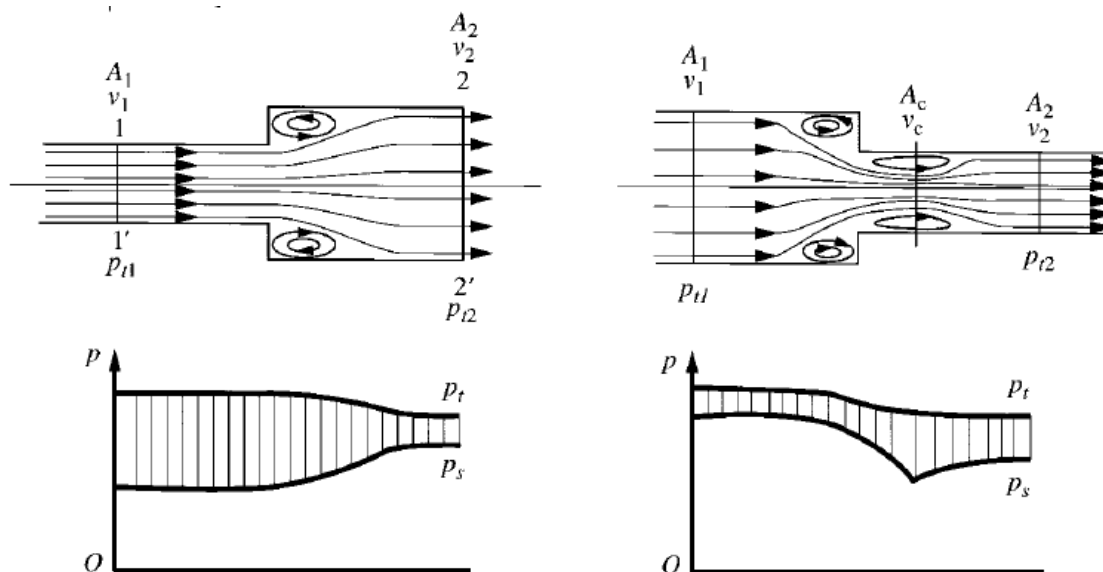
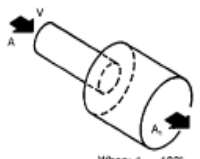
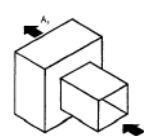
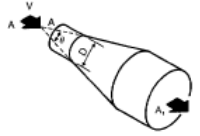
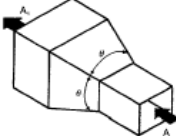
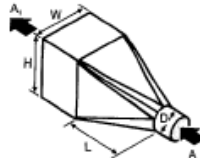
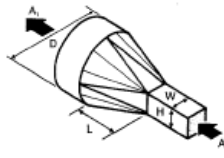
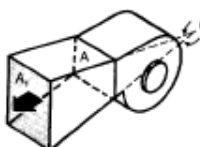
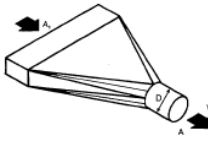


Figura 3.5 - Escoamento em alargamentos e reduções [6]

Na Figura 3.5 do lado esquerdo, o escoamento é num alargamento súbito (SE – *sudden expansion*), em que ocorre a formação de duas zonas de *Eddy* depois da ampliação. Quando o fluido atravessa o acidente geométrico a pressão total começa a diminuir, mas a pressão estática aumenta, pois a velocidade vai diminuindo, devido à diminuição da área de secção. Quando o escoamento voltar a ficar plenamente desenvolvido as pressões mantêm-se uniforme, excepto devido às perdas distribuídas. Do lado direito da mesma figura, o escoamento dá-se numa contracção súbita (SC – *sudden contraction*), mas desta vez forma-se zonas de *Eddy* antes e depois do acidente geométrico. Sendo assim, a pressão total começa a decrescer já antes da contracção, e como o diâmetro da conduta diminui a velocidade aumenta, logo a pressão estática também diminui, excepto a pressão dinâmica.

Na maioria dos casos, ao invés do uso de reduções ou alargamentos súbitos, pode optar-se por uma expansão ou contracção gradual em que as perdas são menores. A maior importância nesses casos é o ângulo formado pelo alargamento/redução. Ângulos mais pequenos do que 5° apresentam uma maior perda de carga distribuída, devido ao seu comprimento excessivo o que não compensa baixar mais o ângulo. Para ângulos superiores a 40° , 60° , a perda torna-se excessiva em relação a uma SE ou um SC. Na Tabela 3.3, encontram-se vários tipos de transições presentes no SMACNA e que também fazem parte da base de dados.

Tabela 3.3 - Tipos de transições [13]

 <p>When: $\theta = 180^\circ$</p>	<p>Alargamento súbito de secção circular. Contracção súbita com sentido de fluxo contrário ao da figura.</p>		<p>Alargamento súbito de secção quadrada. E contracção súbita com sentido de fluxo contrário ao da figura.</p>
	<p>Alargamento cónico ou contracção cónica com vários ângulos de ligação entre as duas faces, secção circular.</p>		<p>Alargamento cónico ou contracção cónica com vários ângulos de ligação entre as duas faces, secção quadrada.</p>
	<p>Transição de secção circular para secção rectangular.</p>		<p>Transição de secção rectangular para secção circular.</p>
	<p>Transição, simetria da conduta de saída do ventilador.</p>		<p>Contracção com transição de secção rectangular para circular.</p>

3.1.4. Unidades de entrada e unidades terminais de ar

As entradas e saídas de ar das condutas são montadas juntas com a parede, ou seja, perpendicularmente à parede, ou com a conduta mais saída para o exterior. Podem ainda existir saliências cónicas ou curvas (Tabela 3.4).

O escoamento do fluido através das entradas, origina na conduta a alteração da direcção das linhas de corrente, formação de zonas de *Eddy* e desenvolvimento da turbulência, o que implica o aumento das perdas de carga (Figura 3.6 do lado esquerdo). Logo após a entrada, a pressão total diminui e a pressão estática também, pois ocorre um aumento súbito da velocidade de escoamento. Mas quando o fluxo começa a ficar plenamente desenvolvido, a velocidade estabiliza e a pressão estática aumenta. As arestas vivas ou saliências causam maiores perdas de carga. Para o caso de saliências fora da parede, o coeficiente de perda de carga é

maior do que se estiver embutido na parede. Se a entrada for complementada com uma saliência cônica, C_i é mais baixo que os anteriores mas maior do que se a saliência for curva [6].

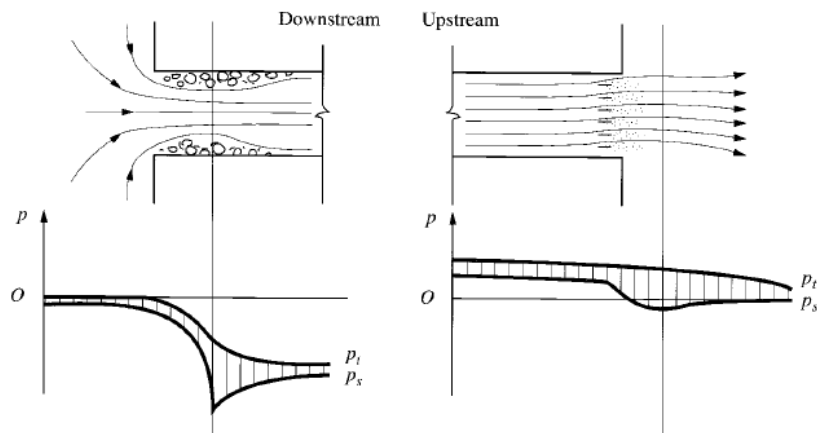
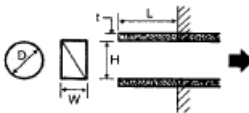
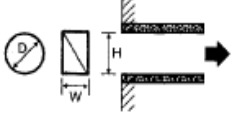
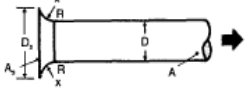
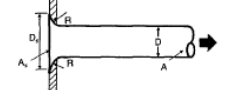
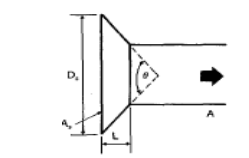
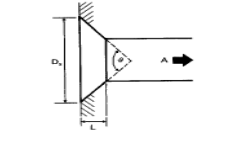
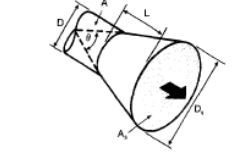
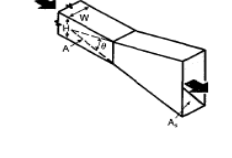


Figura 3.6 - Escoamento nas entradas e saídas de ar das condutas [6]

À saída o fluxo sai da condução a jusante para um largo espaço e perde toda a sua velocidade devido à dissipação da viscosidade. Sendo assim, nos casos com condução em linha recta, o coeficiente C_i é unitário, mesmo que tenha saída arredondada e lisa. A pressão total e a pressão estática decrescem, chegando a ser negativa até se atingir o diâmetro mínimo de fluxo do fluido (*vena contracta*).

Tabela 3.4 – Unidades de entrada e unidades terminais de ar [13]

	Conduta montada na parede com conduta saída para o exterior. Conduta circular ou rectangular.		Conduta montada na parede com entrada paralela à mesma. Conduta circular ou rectangular.
	Entrada com saliência curva e lisa com conduta de secção circular.		Entrada com saliência curva e lisa e paralela à parede. Conduta circular.
	Entrada com saliência cônica com conduta circular ou rectangular.		Entrada com saliência cônica e paralela à parede. Conduta circular ou rectangular.
	Saída cônica, com ou sem parede.		Saída cônica plana de secção rectangular, com ou sem parede.

3.2. Outros componentes/acessórios utilizados em redes aeráulicas

Numa rede aeráulica diversos componentes fazem parte do processo de insuflação ou extracção de ar. As unidades terminais para insuflação permitem introduzir ar condicionado dentro de um determinado espaço, para obter as condições pretendidas. O retorno e extracção do ar “poluído” são assegurados por entradas de ar pelas quais o ar é aspirado para as condutas.

Na insuflação (impulsão de ar) as velocidades do ar são muito superiores às da aspiração. Deve-se ter especial cuidado com as velocidades elevadas para que o jacto de ar não atinja distâncias inconvenientes e que afectam o bem-estar (Figura 3.7). Assim, a insuflação de ar que vai misturar-se com o ar ambiente da zona ocupada quando atingir os habitantes do local não deve ultrapassar uma velocidade terminal de 0,2m/s.

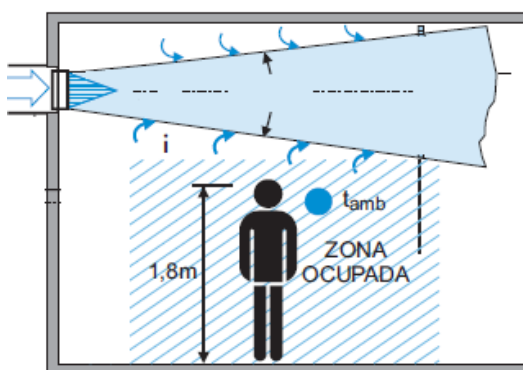


Figura 3.7 - Zona de insuflação sem afectar o bem-estar [7]

Os difusores são normalmente colocados devido à melhor performance na dispersão e direcção do fluxo de ar e também devido ao aspecto estético. As grelhas são elementos de construção bem mais simples, logo são elementos muitos mais baratos.

3.2.1. Tipos de unidades terminais para insuflação

a) Grelhas

Uma grelha consiste numa estrutura que pode ter várias formas e que envolve um conjunto de lâminas dispostas vertical ou horizontalmente ou ambas. Estas permitem efectuar insuflação com deflexão simples, caso a grelha contenha lâminas numa só posição, ou dupla deflexão, caso as lâminas estejam em duas disposições diferentes. Tem por função permitir a passagem do ar insuflado, mas também evitar a entrada de objectos maiores no interior da conduta, animais ou até pessoas. Podem ser aplicadas no tecto, soleiras, chão e em zonas laterais altas. Existem vários tipos de grelhas [9]:

i. Grelhas com lâminas móveis

Permitem o controlo do fluxo de ar. No caso de uma simples deflexão (Figura 3.8 - A), a grelha contém lâminas horizontais ou verticais. As lâminas verticais permitem a deflexão do fluxo de ar num plano horizontal, enquanto que as lâminas horizontais num plano vertical. No que concerne às de dupla deflexão (Figura 3.8 - B), a grelha possui um segundo conjunto de lâminas dispostas normalmente atrás e formando um ângulo recto com as lâminas da frente. Este sistema permite o controlo de entrada de ar em ambos os planos.



Figura 3.8 - Grelha de deflexão simples (A) e grelha de deflexão dupla (B) [8]

ii. Grelhas com lâminas fixas

Diferem das anteriores na impossibilidade de mover as lâminas, sendo que o ângulo do fluxo de ar insuflado depende da deflexão das lâminas fixas. As lâminas podem ser dispostas em linha recta vertical ou horizontalmente ou com um ângulo de inclinação (Figura 3.9).



Figura 3.9 - Grelha de alhetas fixas horizontais [8]

iii. Grelha linear com barra

Contém barras fixas dispostas perpendicularmente ou com determinado ângulo às lâminas. Permite a insuflação de ar numa direcção constante e muitas vezes tem ligado a si plenos (entradas de ar) para controlar o fluxo de ar. Este tipo de grelhas podem ser instaladas em várias secções para um comprimento longo, comprimentos contínuos ou estreitos e longos com o objectivo de serem discretas (Figura 3.10).



Figura 3.10 - Grelha linear de comprimento longo [8]

Vários acessórios podem ser utilizados para melhor a performance das grelhas:

i. Dampers

Podem ser anexados às grelhas de insuflação (registos) ou instalados na conduta como uma unidade separada de regulação do caudal. Basicamente, existem dois tipos de *dampers*. Um deles designa-se por lâminas opostas (Figura 3.11 A) que giram em sentidos opostos e o outro designa-se por lâminas paralelas em (Figura 3.11 B) que estas rodam no mesmo sentido e direcção. Os *dampers* causam a deflexão do caudal de ar, e quando se encontram perto da grelha podem causar uma deformidade no fluxo de ar e aumentar a perda de carga e o ruído.



Figura 3.11 - Tipos de dampers usados em grelhas [9]

ii. Extractores

São usados para promover o fluxo de ar nas grelhas ou nos registros. Podem ser encontrados três tipos de extractores. O extractor de palhetas giratório (Figura 3.12 - C) permite introduzir o ar no registro de forma perpendicular à face da grelha, enquanto que o extractor de palhetas fixas (Figura 3.12 - D) possibilita o mesmo mas com menor performance.

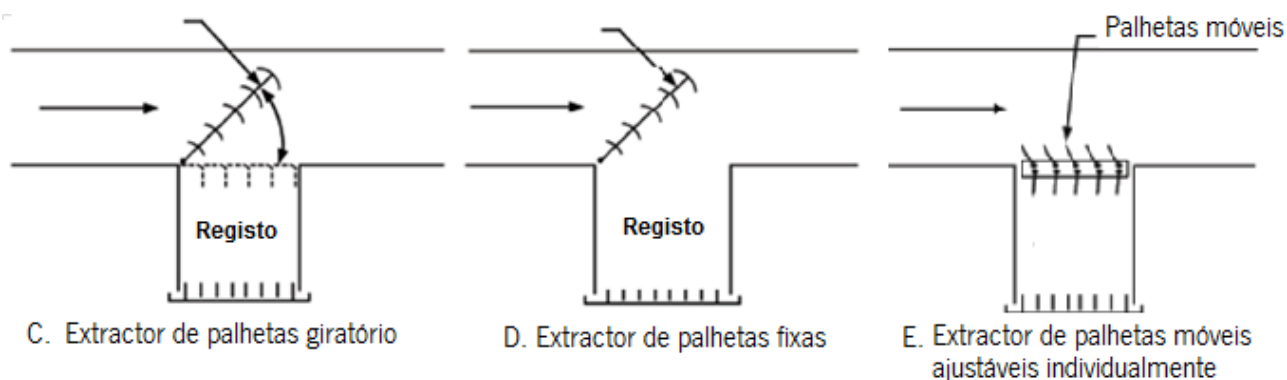


Figura 3.12 - Tipos de extractores [9]

Ambos os dispositivos devem apenas ser instalados nas condutas principais caso o seu comprimento permita colocar-se numa posição paralela à secção circular do tubo sem que indevidamente prejudique a circulação do ar para jusante. Estes sistemas aumentam a perda de carga da rede, aumentam o nível de ruído e limitam o caudal de ar a jusante, mas permitem uma boa distribuição do ar para o registro e, consequentemente, para o espaço a climatizar.

Para além destes, existe o extractor com palhetas móveis ajustáveis individualmente (Figura 3.12 - E), constituído por dois conjuntos de alhetas. Um deles orienta o fluxo para o registro e outro conjunto equilibra o fluxo de ar no registro.

b) Difusores

Os difusores, ao contrário das grelhas, permitem gerar um padrão de descarga de ar radial. São formados por uma zona externa, da qual o ar é insuflado, que pode ter diversas formas geométricas. Para além disso, é formado por um registro que permite a ligação do difusor e a conduta, e também por deflectores

internos que definem os padrões de descarga e direcção. São, maioritariamente, aplicados nos tectos, sendo montados paralelamente aos mesmos. Existem diversos tipos de difusores [9]:

i. Difusores circulares

Constituídos por uma série de anéis cónicos e concêntricos e por cones internos ajustáveis que permitem a insuflação de ar paralelo ou perpendicularmente à superfície de montagem (Figura 3.13). Este tipo de difusores apresenta como principal característica uma difusão circular em que o raio de difusão, que é a distância horizontal da saída de ar e o final do alcance do jacto, depende da velocidade terminal.

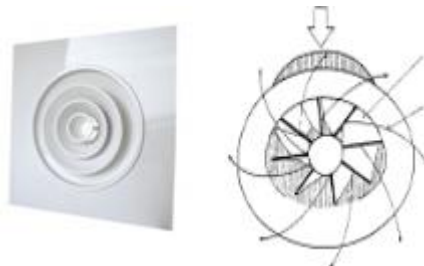


Figura 3.13 - Difusores Circulares [8]

ii. Difusores quadrados

Formados por grelhas quadradas e concêntricas, cujas faces podem estar alinhadas com a superfície de montagem ou podem estar tipo cone desde o centro até à periferia. Apresentam um padrão fixo de descarga horizontal e radial, mas também pode ser ajustável para insuflação vertical ou horizontal (Figura 3.14).

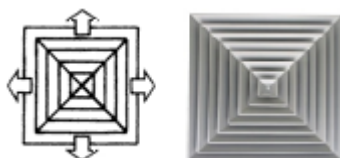


Figura 3.14 - Difusores quadrados [8]

iii. Difusores perfurados

Consiste numa placa perfurada, cuja área de passagem de ar ronda os 50% (Figura 3.15). Apresentam uma maior perda de carga do que outros e um ruído mais elevado. Podem conter um ou vários deflectores.

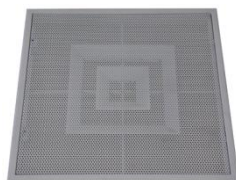


Figura 3.15 - Difusores perfurados [8]

iv. Difusores face-placa

São formados por uma única placa. É utilizado para insuflações horizontais (Figura 3.16).



Figura 3.16 - Difusores de placa [8]

v. Difusores lineares e rectilíneos

Este tipo de difusores pode ser em forma de quadrado ou longos e estreitos e são formados por uma ou várias ranhuras para insuflação de ar, horizontal ou verticalmente (Figura 3.17).



Figura 3.17 - Difusores lineares [8]

O alcance do jacto e o modo de dispersão do cone de ar depende da posição das lâminas do difusor (Figura 3.18). No caso de lâminas paralelas, com a sua posição horizontal o jacto de ar tem uma divergência de cerca de 20° . Caso se utilizem lâminas convergentes, o raio de difusão será mais curto, contudo, apesar do cone de ar inicialmente se tornar mais fechado, posteriormente, será impelido para uma divergência maior. Com a utilização das lâminas divergentes a dispersão do cone ocorre logo à saída da boca de insuflação. Outra opção é a utilização das lâminas paralelas mas com um ângulo de inclinação ajustável, de forma a obter-se um raio de difusão grande e também direccionável para o local pretendido.

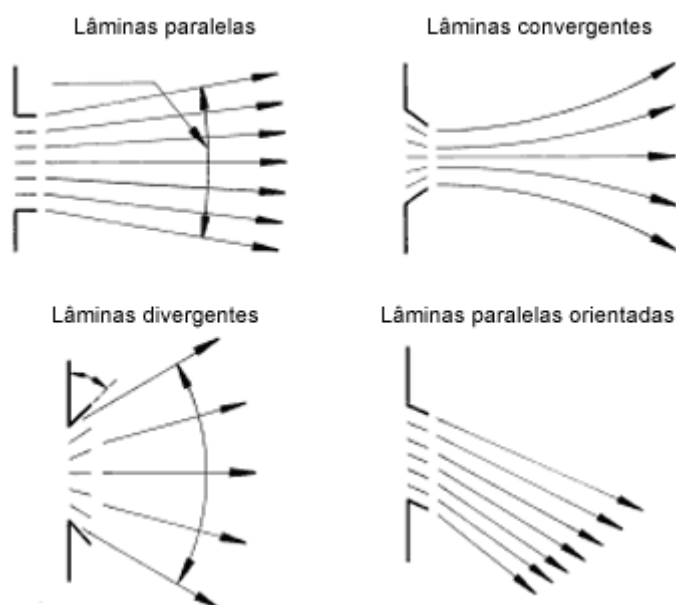


Figura 3.18 - Diferentes formas de dispersão nos difusores rectilíneos ou lineares [8]

vi. Difusores rotacionais

Série de aberturas lineares que em conjunto formam um padrão radial à volta do centro da face do difusor. Apresentam uma elevada indução. Também, existem os difusores rotacionais tipo “swirl”, parecidos com estes, que apresentam uma capacidade mistura do ar insuflado com o ar do compartimento maior (Figura 3.19).



Figura 3.19 - Difusores rotacionais [8]

vii. Difusores multidireccionais

Este tipo de difusores é formado por um ou mais aros, todos com direcções distintas. A descarga pode ocorrer por diversos lados. Na Figura 3.20, mostra-se um exemplo deste tipo de difusores e a quantidade de lados de descarga possíveis de encontrar.

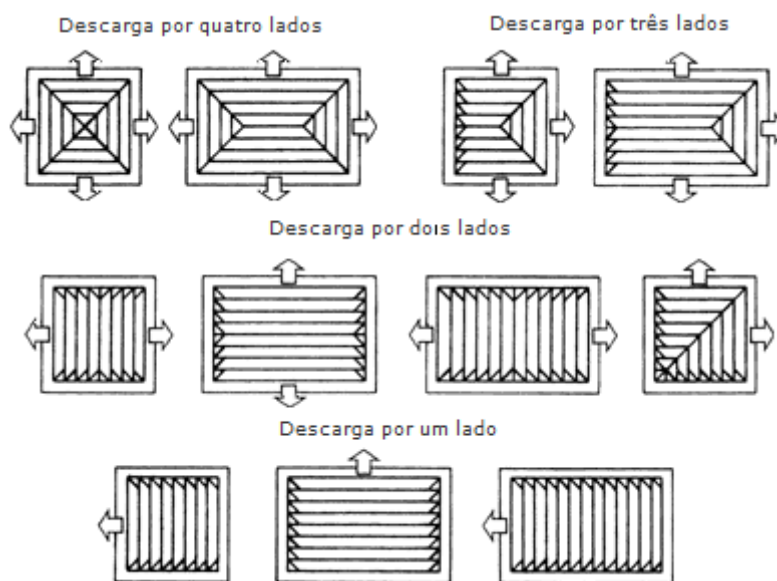


Figura 3.20 - Difusores multidireccionais [8]

Vários acessórios podem ser utilizados para melhorar a performance dos difusores:

i. *Dampers*

Podem ser acoplados ao difusor ou instalados como unidades separadas a instalar na conduta, de forma a regular o volume de ar a insuflar. Existem diversos tipos de *dampers*, entre os quais, dois já foram

referenciados como de lâminas opostas e lâminas paralelas. O *damper* com lâminas ajustáveis (Figura 3.21 em A) permite o ajuste do fluxo de ar com lâminas móveis. Relativamente ao *damper* da Figura 3.21 (B) é constituído por apenas uma lâmina articulada a jusante numa extremidade e que ajusta o fluxo.

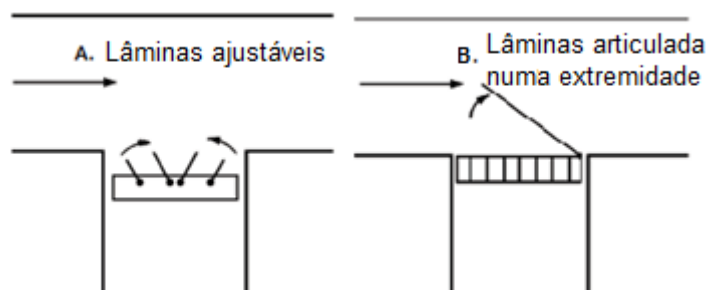


Figura 3.21 - Tipos de *dampers* usados para melhor performance dos difusores [9]

ii. Outros dispositivos de uniformização de fluxo

Podem ser encontrados outros tipos de dispositivos capazes de uniformizar o fluxo para o difusor, sendo que podem ser encontrados em diversos fabricantes.

3.2.2. Entradas para retorno e/ou exaustão de ar

As entradas de ar de retorno podem encontrar-se no interior de uma conduta ou, simplesmente, serem colocadas em zonas em que ocorre a transferência de ar de uma área para outra. Relativamente à exaustão do ar, esta ocorre por remoção de ar do interior do compartimento através de uma rede aeráulica. Muitas vezes usam-se os dispositivos de saídas de ar, como as grelhas e difusores, mas como se trata de entradas de ar, não é necessário promover deflexão do ar nem uniformização, logo, utilizam-se grelhas sem acessórios que permitem essas funcionalidades. Normalmente, utilizam-se das seguintes grelhas [6]:

i. Grelhas de lâminas fixas

São formadas por um conjunto de grelhas horizontais ou verticais. Podem ser aplicadas para retorno de ar através de condutas ou em tecto falso e para extracção ou passagem através de paredes ou lages (Figura 3.22).

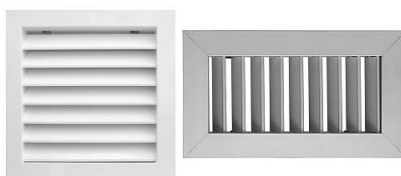


Figura 3.22 - Grelha de extracção de lâminas fixas [8]

ii. Grelhas perfuradas e reticuladas

Apresentam grandes áreas livres de passagem de ar. As grelhas perfuradas contém cerca de 50% dessa área (grelhas em forma de rede), enquanto que as reticuladas podem ultrapassar os 90% (Figura 3.23).

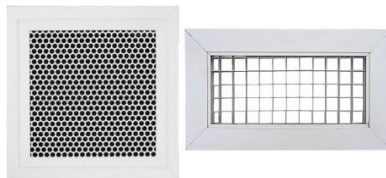


Figura 3.23 - Grelhas perfuradas e reticuladas [8]

3.3. Ventiladores

No ramo aeráulico o componente que promove o movimento do ar é o ventilador. Este elemento é uma turbo-máquina que transmite energia para gerar pressão necessária e manter um fluxo contínuo de ar.

Existem diversas formas de classificar um ventilador. Na maioria das vezes, apenas um ventilador pode ser denominado por diversas formas, atendendo às suas características. Algumas das classificações são relativas [8]:

- a) À função:
 - Ventiladores com envolvente, em que estão circundados pela conduta;
 - Ventiladores murais, ou seja, fixos nas paredes;
 - Ventiladores de jacto, para promover a incidência de correntes de ar em pessoas ou objectos.
- b) Ao tipo de accionamento:
 - Directo, em que o motor eléctrico tem o eixo comum com a hélice;
 - Por transmissão, que permite separar o fluxo de ar do motor eléctrico através do uso de correias ou polias.
- c) Às condições de funcionamento:
 - Ventiladores padrão, que movimentam ar com pequenas quantidades de poluente, humidade, pó e temperaturas máximas de 40°;
 - Ventiladores especiais, são utilizados para transporte de ar poluído, húmido, quente, corrosivo e também em telhados.
- d) Ao percurso do ar (forma do rotor):

- Ventiladores axiais, permite a circulação de ar na direcção axial e é utilizado para condições de baixa diferença de pressão estática e para movimentação de ar mais ou menos limpo;
- Ventiladores centrífugos (Figura 3.24), em que o ar entra na direcção axial e sai na direcção radial. Utilizado para pressões maiores que no caso dos axiais.

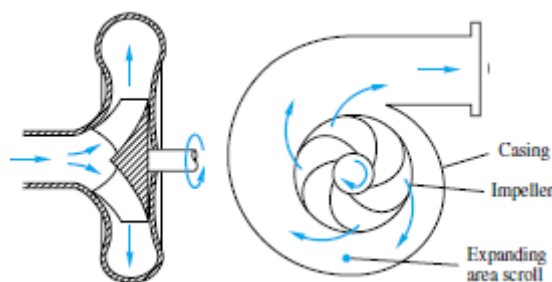


Figura 3.24 - Ventilador centrífugo [3]

e) À pressão:

- Ventiladores de baixa pressão, que normalmente não ultrapassam os 70Pa;
- Ventiladores de média pressão, com a pressão entre os 70 e os 3000Pa. Podem ser centrífugos ou axiais;
- Ventiladores de alta pressão, que são utilizados para pressões de funcionamento superiores a 3000Pa.

3.3.1. Curva característica e selecção de ventiladores

A selecção de um ventilador é muito importante na eficiência da rede aeráulica. Devem ser tomados para tal efeito, os seguintes passos [2]:

1. Caudal de ar necessário;
2. Pressão estática do ventilador determinada pela perda de carga total da rede;
3. Tipo de material que atravessa o ventilador (densidade, perigo de explosão);
4. Tipo de accionamento, directo ou por intermédio de outros componentes como uma correia ou polias;
5. Limitações de espaço;
6. Ruído;
7. Temperatura do ar;

8. Rendimento;
9. Verificar a ocorrência de aplicações corrosivas que impliquem a necessidade de revestimentos especiais.

Depois de determinadas as necessidades da rede aeráulica em termos de caudal e pressão estática, deve traçar-se a curva da instalação. Através equação 22, determina-se a constante K, para de seguida, com a introdução de diversos valores de caudal, obter a perda de carga respectiva e, assim, traçar a curva da instalação.

$$\Delta H = k * Q^2 \quad (22)$$

No seguimento, deve-se colocar a curva do ventilador para diversas potências, que depende dos mesmos parâmetros da curva da instalação, no mesmo gráfico. Marcar o ponto pretendido correspondente ao caudal e perda de carga total nesse gráfico. Caso, o ponto pretendido fique acima da intersecção entre curvas, então, deve-se seleccionar a curva seguinte correspondente a outro ventilador e obtém-se o ponto de funcionamento do ventilador, através da intersecção entre as curvas (Figura 3.25).

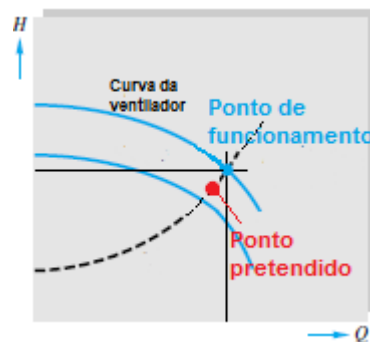


Figura 3.25 - Ponto de funcionamento no gráfico de variação da pressão estática com o caudal de um ventilador [3]

De salientar, que a posição do ponto de funcionamento não deve estar numa zona da curva característica muito inclinada, pois, uma pequena variação da pressão estática, implicará grandes variações do caudal. Deve-se, também, procurar um ponto de funcionamento que não se afaste muito do pico da curva característica, melhorando assim a potência consumida [2].

Esta selecção poderá não ser definitiva devido a exigências de baixa poluição sonora, sendo por isso, necessário, a selecção de um ventilador com uma velocidade de rotação inferior à do seleccionado. Outra forma possível de inverter esta situação confere a utilização de uma caixa isolante.

4. Desenvolvimento de folha cálculo para dimensionamento de redes aeráulicas

O *software* desenvolvido teve como base, e a pedido da empresa LUSITAR, a ferramenta de cálculo *Excel*. Para além deste, utilizou-se o seu programador acoplado, *Visual Basic*. O objectivo da utilização de algoritmia juntamente com o *Excel* teve por objectivo automatizar o processo de cálculo o mais e melhor possível, principalmente, no que concerne à base de dados das perdas de carga localizadas.

O programa desenvolvido está dividido em duas partes, que foram criadas devido à possibilidade de o operador executar dois métodos de dimensionamento diferentes conforme as necessidades e o tipo de instalação requerida (Figura 4.1).

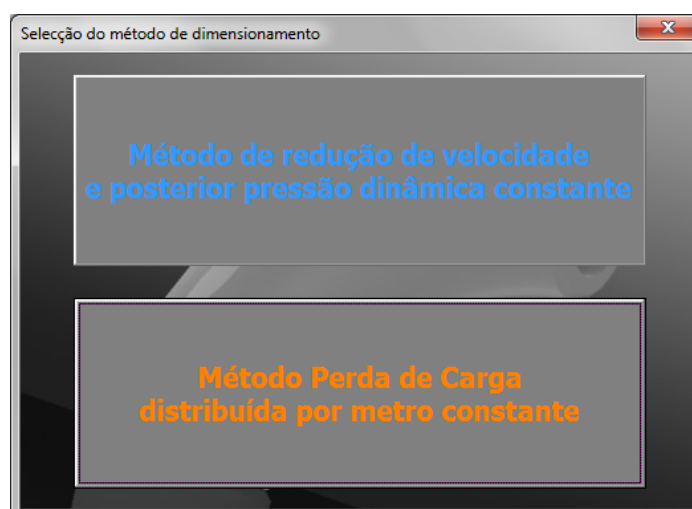


Figura 4.1 - Seleção do método de dimensionamento

Dentro de cada método, o cálculo em algumas partes é semelhante, contudo, o modo de introdução de dados e outras operações de cálculo podem variar de acordo com o método. Nesta dissertação, para facilitar na designação dos métodos, o método de redução de velocidade e pressão dinâmica constante pode ser designado por método 1, e o método de perda de carga distribuída constante pode ser chamado por método 2. O fluxograma do processo de utilização básica da folha de cálculo encontra-se na Figura 4.2. O primeiro passo é a escolha do método pretendido. De seguida, as variáveis de entrada são o caudal de ar novo e a velocidade limite à saída do ventilador. Como variáveis calculadas, serão obtidas as dimensões das condutas e seus acidentes geométricos, caudais e dimensões de grelhas e difusores. Por último, à saída as variáveis obtidas serão relativas à perda de carga total máxima e a potência do ventilador.

O acesso à base de dados das perdas de carga localizadas é efectuado da mesma forma em ambos os casos. Sendo assim, no capítulo 4.1 e 4.2 será explicado cada método de dimensionamento em separado.

Antes de iniciar o processo de dimensionamento da rede aeráulica, é necessário conhecer e compreender as razões pelas quais o utilizador optou por determinado método. Essa escolha será debatida no final da comparação dos métodos.

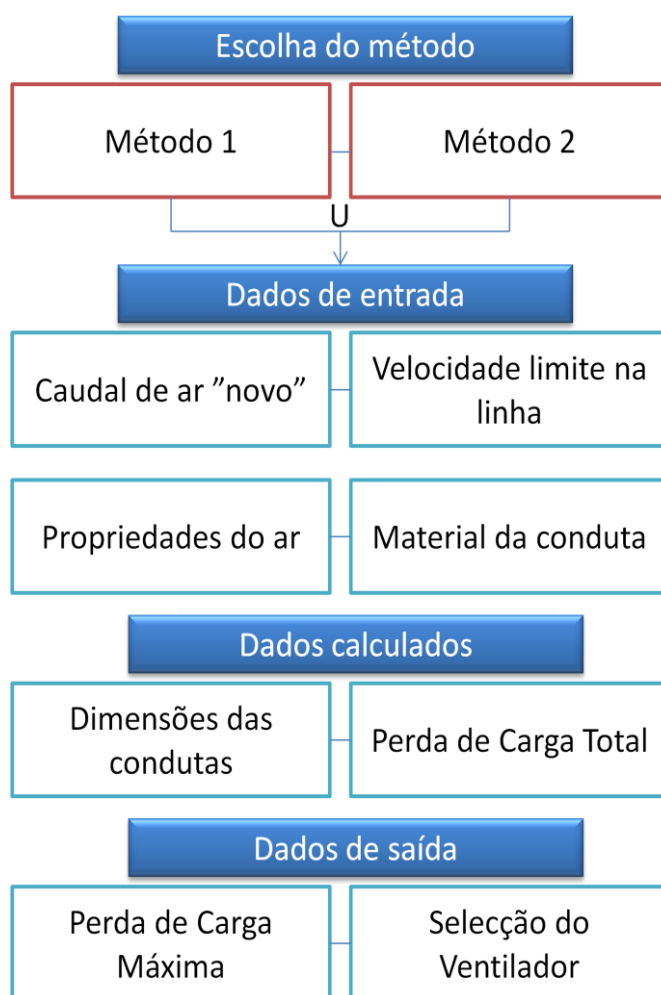


Figura 4.2 - Fluxograma de funcionamento da folha de cálculo

4.1. Método de redução de velocidade e pressão dinâmica constante

Como o próprio nome indica este método impõe que a pressão dinâmica seja constante ao longo da rede aeráulica. Pela equação de *Bernoulli*, a única variável influente na pressão referida é a velocidade, que terá de ser constante ao longo da instalação. Contudo, a velocidade de escoamento poderá ser elevada

demais o que causa uma propagação sonora inaceitável (ruído). Nesses casos, promove-se a redução da velocidade, ou seja, o aumento da pressão estática.

A sua aplicação deve ser efectuada do seguinte modo:

- i. Seleccionar a velocidade inicial à saída do ventilador, desde que a mesma não ultrapasse os valores de ruído estabelecido pelas normas;
- ii. Indicar o caudal necessário;
- iii. Através dos pontos i e ii estabelecidos, determinar o diâmetro equivalente e, de seguida, o diâmetro comercial;
- iv. Com a alteração do diâmetro por motivos comerciais, torna-se necessário calcular a velocidade real, e só depois a pressão dinâmica na conduta principal. Esta pressão terá que ser constante ao longo da rede de condutas, com a possibilidade de uma alteração na ordem dos 10%, definidos pela empresa em casos de redução de velocidade;
- v. A partir daqui o processo é inverso. A partir da altura dinâmica, obtêm-se a velocidade de escoamento e o diâmetro (equação 23), que terá de ser corrigido para o comercial;

$$D = \sqrt[4]{\frac{16Q^2}{2g\pi^2H_d}} \quad (23)$$

- vi. Quando ocorrer a redução do caudal, é necessário calcular o novo diâmetro comercial, menor, para que a pressão dinâmica se mantenha constante;
- vii. Calcular todas as perdas de carga na rede, quer por atrito viscoso quer por atrito cinético;
- viii. Determinar a maior perda de carga total para a selecção da potência do ventilador.
- ix. Calcular a necessidade de equilíbrio do sistema recorrendo a *dampers*.

O programa está dividido em duas partes:

- i. Introdução de dados e restrições relativos à instalação (especificações);
- ii. Dimensionamento feito por secção e com recurso à base de dados das perdas de carga localizadas.

Todas as folhas de cálculo referentes a este método encontram-se no anexo A, na Figura A1, Figura A2, Figura A3 e Figura A4. A seguir será explicado todo o processo de dimensionamento pelo método 1. O fluxograma que representa um algoritmo de utilização deste método, está no anexo C, na Figura C1.

4.1.1. Introdução de dados, restrições e obtenção de resultados iniciais

A instalação de uma rede aeráulica pressupõe a existência de necessidades por parte do cliente. Essas devem ser tomadas em conta desde o início por parte do engenheiro. O caudal de ar novo a insuflar depende do tipo de actividade que ocorre no compartimento ao qual se pretende condicionar o ar. Para além disto, surgem sempre restrições, tais como: velocidade limite de escoamento de ar devido à propagação do ruído; instalação das condutas tem que ser feita, tendo por base o espaço possível para a sua instalação (em caso de edifícios pré-existent); velocidade requerida à saída das grelhas. Inicialmente, o utilizador deve inserir este tipo de dados na folha de cálculo “Dados Instalação”, e que serão de seguida explicados:

i. Introdução do caudal de insuflação ou extracção ou retorno necessário ao local

O dimensionamento da linha depende do caudal de ar que circula nas redes aeráulicas. Esse caudal será diferente conforme o objectivo: insuflação, extracção ou retorno.

Caso o objectivo seja a insuflação de ar novo o utilizador tem a opção de cálculo do caudal de ar novo com base no RSECE, no qual diz no artigo 29 que deve ser garantido um caudal mínimo de ar novo num edifício com sistemas de climatização com ventilação mecânica. Para isso, deverá clicar-se no botão de acesso ao formulário de cálculo. No programa o seu valor deve ser colocado em metros cúbicos por hora (Figura 4.4 – Ponto 1).

ii. Definição da velocidade máxima do ar em função do local

De seguida, o utilizador deverá colocar a velocidade limite de escoamento de ar nas condutas (m/s), de forma, a que a pressão sonora originada esteja dentro dos valores limite máximos (Figura 4.4 – Ponto 2).

A Tabela 4.1, indica as velocidades máximas recomendáveis dependendo da localização da instalação. Ambos os métodos utilizam estes valores, contudo, o utilizador pode indicar outros valores que não estes, não sendo de carácter obrigatório o acesso aos mesmos. Para aceder a esta tabela, clica-se no botão *ok* ao lado do ponto 2 (Figura 4.4), o qual abre uma janela de selecção do local ao qual será instalada uma rede aeráulica. Nesse formulário abre-se a *combobox* e, de seguida, selecciona-se o local (Figura 4.3). Automaticamente surge a velocidade recomendada, bastando clicar em “Inserir” para colocar o valor na célula respectiva.

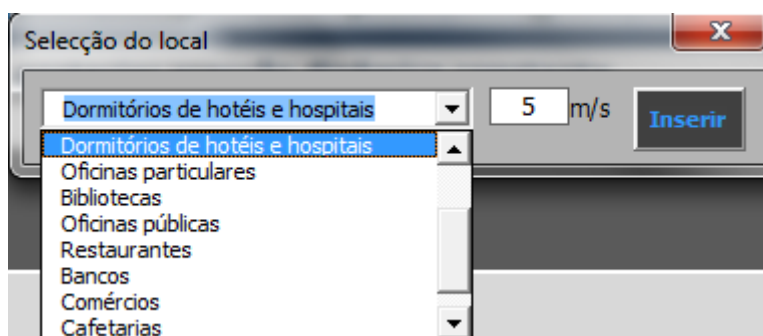


Figura 4.3 - Seleção do local da instalação da rede aeráulica

Tabela 4.1 - Velocidade recomendável para evitar pressões sonoras elevadas [10]

Aplicações	Velocidade recomendável (m/s)
Residências	3
Auditórios Salas de teatro	4
Apartamentos Dormitórios de hotéis e hospitais	5
Oficinas particulares Bibliotecas	6
Oficinas públicas Restaurantes Bancos	7,5
Comércios Cafetarias	9
Indústria	12,5

iii. Delimitação da redução da velocidade

Neste ponto deverá colocar-se o ponto no qual a velocidade de escoamento do ar deve-se manter constante (Figura 4.4 – Ponto 3), para que a pressão dinâmica também seja fixa, como é o objectivo do método. De salientar, que não é possível manter constante a pressão dinâmica devido à limitação da existência de diâmetros de conduta comerciais.

Figura 4.4 – Dados, restrições da rede aeráulica

iv. Cálculo do diâmetro de saída do ventilador/conduta inicial

Depois de introduzidos os valores do caudal e da velocidade limite, é calculado automaticamente a área e, consequentemente, o diâmetro referente à saída do ventilador, no campo dos resultados úteis (Figura 4.5 – Ponto 4 e 5, respectivamente). Denote-se que o seu diâmetro real será diferente devido às restrições de diâmetro disponíveis comercialmente.

A interface 'Resultados úteis' apresenta os seguintes dados:

Índice	Descrição	Valor	Unidade
4	Área de passagem	0,10	m ²
5	Diâmetro inicial sugerido	0,36	m

Figura 4.5 - Diâmetro de saída do ventilador (não comercial)

v. Selecção das propriedades do ar

As propriedades do ar úteis ao dimensionamento da instalação não sofrem alterações significativas com a temperatura, contudo, o programa contém uma lista de temperaturas, do qual basta seleccionar sendo posteriormente apresentados os valores da massa volúmica (kg/m³) e da viscosidade dinâmica (kg/m.s). Na Figura 4.6, existe uma *combobox* (ferramenta do *Excel*) em que sobre a mesma se pode clicar e seleccionar a temperatura.

A interface 'Propriedades do ar' apresenta os seguintes dados:

Índice	Descrição	Valor	Unidade
6	Temperatura (T)	20	°C
7	Massa volúmica (ρ)	1,2042	kg/m ³
8	Viscosidade dinâmica (μ)	1,82E-05	kg/m.s

Figura 4.6 - Propriedades do ar

vi. Selecção do material das condutas

Os materiais utilizados na construção de condutas para redes aeráulicas encontram-se listados no capítulo 2.4. A característica do material importante no dimensionamento das condutas é a rugosidade (ϵ). Para seleccionar o material basta aceder à *combobox* criada para tal efeito, tal como está evidenciado na Figura 4.7 no ponto 9. O ponto 10, indica o valor da rugosidade do material em metro.



Figura 4.7 - Seleção do material da conduta

vii. Adicionar ramais para além da conduta principal

Na selecção do ventilador a perda de carga total da instalação é uma propriedade muito importante. O ventilador deverá ser seleccionado com o objectivo de vencer o máximo de todas as perdas de carga de todos os ramais da instalação, ou seja, determinar qual a linha da instalação que apresenta maior perda de carga. Para criar ramais secundários, deverá clicar sobre o botão “Adicionar ramais” (Figura 4.8 – Ponto 11) e depois apenas colocar o nome do ramal que pretende. Este passo pode não ser obrigatório caso a instalação não possua derivações, já que são estas que originam outros ramais. No ponto 12 da mesma figura, apenas se encontra um botão para aceder ao dimensionamento da conduta principal.

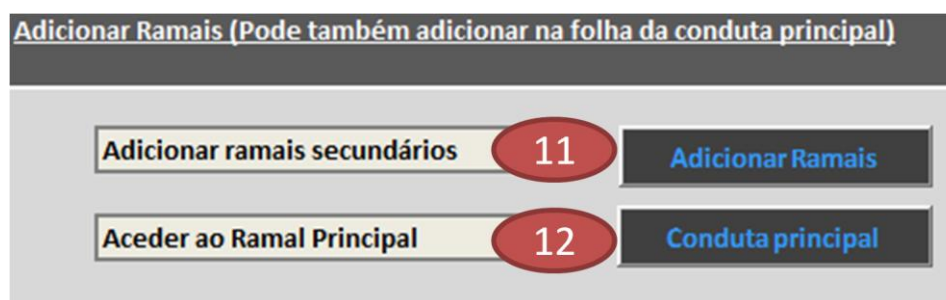


Figura 4.8 - Adicionar ramais para além da conduta principal

viii. Seleção de grelhas e/ou difusores

Nos casos de insuflação ou extracção são necessários meios que permitam, o ar sair da conduta e ser insuflado para o espaço, ou então, para receber ar para a conduta por extracção. Para esses meios são utilizadas grelhas e/ou difusores para a insuflação e apenas grelhas para extracção.

O programa permite a opção quer de um ou de outro meio. Relativamente às grelhas, dever-se-á introduzir alguns dados iniciais. Ao longo de toda a instalação podem existir várias dimensões de grelhas e o *software* encontra-se preparado para isso, contudo, em muitos casos apenas se utiliza uma dimensão para facilitar a instalação. Assim, para adicionar grelhas, o utilizador deverá introduzir o caudal total pretendido que será insuflado ou extraído (Figura 4.9 – Ponto 13). Na Figura 4.9, no ponto 14, deverá ser colocada a velocidade máxima à saída das grelhas, que não deve ultrapassar os 3 m/s de forma a não prejudicar o bem-estar das pessoas que estarão no local a ser climatizado.

O próximo passo será definir a quantidade e as dimensões das grelhas a serem colocadas ao longo das condutas. A definição do número de grelhas tem que ser colocado de acordo com o espaço a climatizar, o distanciamento entre grelhas e comprimento da instalação (Ponto 15).

Grelhas [Save] 22

Caudal total neste tipo de grelhas	13	4500	m³/h
Velocidade requerida nas grelhas	14	3	m/s
Nº de grelhas	15	17	qtd.
Secção da grelha seleccionada	17	A 300	B 100
Área de grelhas	16	0,42	m²
Área efectiva de cada grelha	18	0,51	m²
Velocidade efectiva de cada grelha	19	2,45	m/s
Caudal por grelha	20	0,07	m³/s
Perda de carga (dada pelo fornecedor)	21	3,00	Pa

Figura 4.9 - Selecção de grelhas

A área de secção das grelhas (Ponto 16) é calculada pela equação 1, na qual o caudal é o valor introduzido no ponto 13 e a velocidade no ponto 14. De seguida, deve-se seleccionar as dimensões da grelha (Ponto 17) que apresente uma área semelhante à calculada (não será igual devido às opções comerciais). A partir daí serão apresentados, automaticamente, dos pontos 18 e 19 o valor da velocidade efectiva à saída da grelha e o do caudal por grelha, respectivamente. Por último, deverá ser introduzido o valor da perda de carga da grelha tendo em conta o caudal e a presença de *dampers* para direccionar o seu escoamento. Esse valor terá de ser obtido junto do fabricante (Figura 4.9 – ponto 21).

Depois de todos os dados inseridos e calculados, clica-se no botão (Ponto 22) para adicionar a grelha dimensionado a uma lista, tal como é demonstrado na Figura 4.10. Os dados essenciais ao dimensionamento da instalação encontram-se aí colocados para futuro acesso, sendo possível dar o nome comercial que cada grelha tem.

Nº	Lista de grelhas	Qtd.	Caudal (m³/s)	ΔH (Pa)
1	Grelha 300*100	17	0,07	3
2				
3				
4				

Figura 4.10 - Listagem das grelhas seleccionados

Caso se pretendam colocar difusores na rede aeráulica, a sua selecção deverá ser realizada juntamente com o programa *Easy Product Finder* da *Trox* ou outro meio de fornecedores diferentes. No ponto 23 da Figura 4.11, deverá ser introduzido o caudal total no tipo de difusor pretendido, bem como o número de difusores (ponto 24). O programa calcula automaticamente o caudal por difusor, útil para o dimensionamento das condutas (Figura 4.11 – ponto 25). De acordo com o fabricante, bastando para isso no programa da Trox introduzir o caudal, obtém-se a perda de carga, a qual deverá ser colocada na célula referida no ponto 26 da mesma figura.

Input	Value	Unit
Caudal total neste tipo de difusores	2500	m³/h
Nº de difusores	17	qtd.
Caudal por difusor	0,041	m³/s
Perda de carga (dada pelo fornecedor)	1	Pa

Figura 4.11 - Selecção de difusores

Depois de definidos todos os pontos necessários, clica-se no botão ao lado do ponto 27 da Figura 4.11, para adicionar os dados essenciais ao dimensionamento a uma lista, como se vê na Figura 4.12.

L	Lista de difusores	Qtd.	Caudal (m³/s)	ΔH (Pa)
A	Swirl Diffuser	17	0,041	1
B				
C				
D				
E				

Figura 4.12 - Listagem dos difusores seleccionados

4.1.2. Dimensionamento da conduta principal

Depois de todos os dados e restrições introduzidas no programa, inicia-se o dimensionamento das condutas. A zona de cálculo está dividida em 4 partes: secções e caudal por secção; selecção de diâmetro; cálculo da velocidade e pressão dinâmica; cálculos de perda de carga.

i. Adicionar/eliminar secções à conduta principal

O dimensionamento será efectuado dividindo os diversos cálculos por secções. Estas serão criadas sempre que ocorrer alteração do caudal. Assim, no caso de existirem grelhas, deverá criar-se a secção após a grelha, de forma a utilizar o caudal maior para cálculos de perda de carga. Outra situação remete-se à utilização de derivações, no qual o caudal de ar é dividido. Nesses casos, a secção deverá ser criada antes da

derivação, de forma a calcular as perdas de carga antes e depois da mesma. Para adicionar as secções basta colocar o número de secções pretendidas e clicar no botão *ok* (Figura 4.13 – Ponto 1). Surge também a possibilidade de eliminar secções, caso durante o dimensionamento o utilizador se engane (Ponto 2).

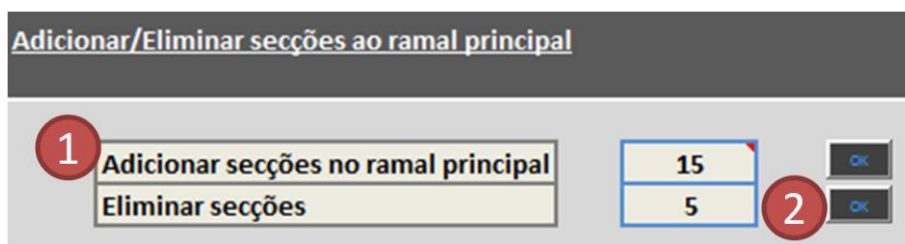


Figura 4.13 - Adicionar/Eliminar secções à conduta principal

ii. Secções e respectivo caudal

Nesta primeira etapa do dimensionamento, o objectivo é determinar o caudal que circula em cada secção criada (Figura 4.14). Contém quatro colunas, em que a primeira é um contador de secções (Ponto 3), no ponto 4 da mesma figura, na segunda coluna, define-se o tipo de saída de ar (grelha ou difusor), a terceira indica o caudal que será insuflado/extraído pela grelha ou difusor (Ponto 5) e, finalmente, a quarta célula subtrai o caudal inicial da secção ao caudal insuflado/extraído na própria secção (Ponto 6).

3		4	5	6
Secção	Nº ou L	Caudal por Grelha/Difusor	Caudal (m^3/s)	
1	1	0,0735	1,25	
2	1	0,0735	1,18	

Figura 4.14 - Determinação do caudal por secção

iii. Área de selecção do diâmetro

O utilizador terá que seleccionar o tipo de secção da conduta através dos botões de opção de secção rectangular ou secção circular (Figura 4.15 – Ponto 7). O diâmetro à saída do ventilador (secção 1), ou seja, o diâmetro correspondente à secção 1, deverá ser semelhante ao calculado no ponto 4 do capítulo 4.1.1, no qual apenas será diferente devido à obrigação de utilização de diâmetros comerciais, quer para condutas circulares quer para condutas rectangulares. Na Figura 4.15, no ponto 8, introduz-se as dimensões dos lados da conduta rectangular, a partir de valores comerciais, a partir do qual o programa efectua o cálculo automático do diâmetro equivalente, tal como a equação 21. Caso se trate de conduta circular deve ser colocado na célula correspondente o valor comercial existente.

Secção Rectangular			Secção Circular	
Rectangular			Circular	
A (mm)	B (mm)	D.Eq (mm)	Diâmetro (mm)	Diâmetro sugerido (mm)
500	250	381		380,844
500	250	381		380,844

Figura 4.15 - Selecção do diâmetro da conduta

A coluna do diâmetro sugerido é um cálculo automático tendo por base as condições do método, e que será explicado no ponto seguinte.

iv. Cálculo de velocidades e pressões dinâmicas

Na secção 1, dependendo do diâmetro seleccionado, a velocidade real (Figura 4.16 – Ponto 12) e pressão dinâmica real (Figura 4.16 – Ponto 13) serão calculadas pelas equações 1 e 8 (termo cinético), respectivamente. Ao longo das restantes secções, o processo de cálculo é o mesmo, contudo, existe a possibilidade de o utilizador optar pelos valores sugeridos que são calculados tendo por base o método. A velocidade sugerida vai diminuindo até um valor mínimo que pode ser sugerido pelo utilizador, e que já foi explicado no capítulo 4.1.1 no ponto 3. Essa velocidade mínima tem de garantir ar suficiente para alimentar as bocas de saída. A partir daí o programa mantém constante o valor da velocidade. O mesmo acontece com a pressão dinâmica, pois é dependente desta. É nesta situação que surge a importância do diâmetro sugerido (Figura 4.16 – Ponto 10), pois o programa calcula automaticamente o diâmetro mais apropriado através da equação 22, a partir do qual o utilizador apenas terá que alterar o diâmetro comercial até que seja semelhante ao sugerido.

11 Velocidade		12 Pressão Dinâmica	
Velocidade Sugerida (m/s)	Velocidade real (m/s)	Pd Sugerida (m)	Pd real (m)
10,97	10,97	6,14	6,14
10,33	10,33	5,44	5,44

Figura 4.16 - Velocidade e pressão dinâmica

v. Cálculo das perdas de carga

O objectivo desta etapa é determinar os valores das perdas de carga distribuídas e localizadas. Para o cálculo das perdas de carga distribuídas (Ponto 16 da Figura 4.17) pela equação 10 é necessário o comprimento da secção, o número de Reynolds, velocidade (definida anteriormente) e o factor de atrito. Na

coluna 1, ponto 13 da Figura 4.17, deve inserir-se o comprimento de cada secção. Na coluna seguinte, calcula-se o número de Reynolds pela equação 14 e na terceira coluna (ponto 15) o factor de atrito que é determinado pela equação 16 ou 20, em caso de regime laminar ou turbulento, respectivamente.

Por último, o cálculo das perdas de carga localizadas que rege-se pela equação 10, necessita de acesso à base de dados criada em *Visual Basic* que aglomera a maioria das perdas de carga localizadas presentes no SMACNA (construção, utilização, explicada mais à frente). O utilizador apenas tem de aceder à base de dados pelo botão das perdas localizadas, escolher o tipo de acidente geométrico e colocar os dados pedidos, que automaticamente o valor do coeficiente de perda de carga localizada será adicionado à célula em que se colocam todos os valores de C_i presentes na instalação. Contudo, podem existir acidentes geométricos que não estão contemplados na base de dados, por isso, no ponto 19, poderá ser colocado outros valores do coeficiente C_i caso sejam conhecidos. Outro valor que surge na soma deste tipo de perdas, são as perdas localizadas originadas pelas grelhas e/ou difusores (Figura 4.17 – Ponto 20).

Comprimento (m)	Perdas de Carga								
	14 Reynolds	15 factor de atrito (f)	16 Pc Distribuídas (m)	Coeficiente C	18 Pc Localizadas (m)	Outras Pc L (m)	20 Pc Loc. Grel/Dif.	21 Pc L Total	22 Pc Total (m.c.ar)
13	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	17	#DIV/0!	19	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!
	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		#DIV/0!		0,00	#DIV/0!	#DIV/0!

Figura 4.17 - Determinação das perdas de carga

O valor da perda de carga total é automaticamente determinado (Ponto 21) somando todos estes termos anteriormente explicados, calculados no ponto 16 e 20 da Figura 4.17.

vi. Gráficos de análise de resultados

A área do programa que está representada na Figura 4.18, consiste na obtenção de gráficos que permitem uma comparação entre diversos parâmetros utilizados no dimensionamento. Na área em que surge o ponto 23, existem quatro botões de criação automática de gráficos: perda de carga total ao longo do comprimento, que permite acompanhar as alterações da perda de carga total ao longo da instalação e, assim, verificar se existem alguns picos de perda de carga que possam criar perdas de energia enormes, podendo-se proceder a alterações no dimensionamento que evitem grandes perdas em determinada secção; outro gráfico é o valor da pressão dinâmica por unidade de comprimento, que revela ser muito importante, pois o próprio método consiste na manutenção da pressão dinâmica a partir de uma determinada velocidade de escoamento, e, assim, verificar se o método está a ser cumprido e se as alterações ao termo cinético são mínimas; gráfico de perdas de carga distribuídas por metro, que permite analisar as variações deste parâmetro e possibilitar a comparação com o outro método; por último, cria um gráfico que relaciona as

perdas de carga localizadas com as distribuídas, permitindo ao utilizador verificar quais as perdas significativas na instalação e que podem ser revistas para diminuí-las.

No ponto 4 da Figura 4.18, encontra-se um botão que permite apagar todos os gráficos criados, sem ter que os eliminar manualmente.

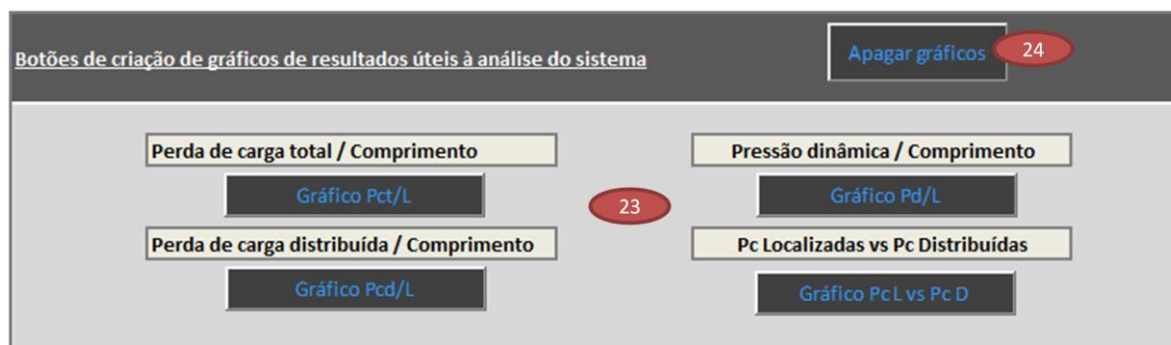


Figura 4.18 - Obtenção de resultados em gráficos

4.1.3. Dimensionamento de ramais secundários

A criação de ramais secundários já foi explicada no capítulo 4.1.1, contudo surgem algumas diferenças no dimensionamento e na introdução de dados.

i. Introdução de dados iniciais

O caudal inicial no ramal deverá ser igual ao último caudal verificado no ramal anterior. Esse valor deverá ser colocado na célula de forma manual (Figura 4.19 – Ponto 1). Caso se deseje colocar outra velocidade limite que não a do ramal anterior, dever-se-á colocar o mesmo na célula respectiva (Ponto 2 da Figura 4.19).

Figura 4.19 - Introdução de dados no dimensionamento dos ramais secundários

Surge também nesta secção o valor da perda de carga total do ramal, que será calculado posteriormente (Figura 4.20 – Ponto 3). Este valor é muito importante, pois é aqui que o programa acede para saber qual a perda de carga de cada ramal, de forma a que na junção dos ramais faça a soma do total da perda de carga.

Figura 4.20 - Perda de carga total do ramal secundário

ii. Criação/Eliminação de secções no ramal

Tal como na conduta principal, há a possibilidade de criar secções no ramal ou de eliminar as mesmas (Figura 4.21 – Ponto 4). O processo é igual ao explicado no capítulo 3.1.2.

Figura 4.21 - Perda de carga e criação/eliminação de secções

iii. Dimensionamento do ramal e criação de gráficos para análise de resultados

Processo semelhante ao explicado no capítulo 4.1.2 nos pontos 2, 3, 4, e 5. A única alteração surge na determinação do caudal, uma vez que agora o seu valor é o obtido como explicado no ponto 1 deste capítulo. A criação de gráficos para posterior análise de resultados é igual à explicada no capítulo anterior.

4.1.4. Outras perdas de carga e resultados finais

Outros componentes da instalação que podem ser utilizados nas redes aeráulicas, criam perdas de carga que também devem ser contabilizadas para o dimensionamento. Contudo, essas perdas devem entrar para o cálculo final da perda de carga total, independentemente do ramal com maior perda de carga. Este passo pode ser efectuado antes ou depois de seleccionados os conjuntos dos ramais. Para sua introdução, basta introduzir o nome do equipamento, quantidade e perda de carga (Figura 4.22 – Ponto 1 e 2, respectivamente), que depois o total deste tipo de perdas de carga será somado à perda de carga total máxima da instalação.

Perdas de cargas de equipamentos não referenciados no dimensionamento das condutas

Nº	Descrição do equipamento	Qtd	ΔH (m)	ΔH (m) Total
1	Filtro 1	2		0
2				0
3				0
4				0
5				0

Figura 4.22 - Perdas de carga de outros equipamentos

4.1.5. Perda de carga máxima e selecção do ventilador

A selecção do ventilador é feita com base no caudal necessário e na perda de carga máxima da instalação. Na folha de cálculo Resultados, deve-se seleccionar todos os ramais e, consequentemente, será obtida a maior perda de carga. Para tal, clica-se no botão “Adicionar Conjunto de Ramais” e, surgirá um formulário para selecção de todos os conjuntos de ramais da rede (Figura 4.23). Primeiro, deve-se colocar o nome do conjunto de ramais para fácil distinção entre ramais (Ponto 3). Para a criação destes, clica-se sobre a caixa de combinação (Ponto 4) e selecciona-se o ramal pretendido e todos os outros que em conjunto formam um ramal desde o ventilador até ao último segmento de conduta. Todos os ramais escolhidos aparecem listados e com a respectiva perda de carga (Ponto 5). Para calcular o total de perdas deve-se clicar sobre a calculadora (Ponto 6). Caso, o utilizador se engane, tem a opção de clicar sobre o botão vermelho (Ponto 7) e, assim, apagar o ramal seleccionado. Novamente, deve recalcular a perda de carga total, que surge ao lado do nome escolhido pelo utilizador (Ponto 3). Finalmente, para adicionar o ramal criado à folha de resultados, apenas deve-se clicar sobre o botão Adicionar Ramal.

The screenshot shows a software window titled "Seleção dos ramais completos". It contains the following elements:

- Nome do Ramal Completo:** A text input field containing "Conduta principal + ramal" (marked with a red circle 3).
- Perda de Carga Total:** A text input field showing "18.51" and a unit "m" (marked with a red circle 8).
- Adicionar Ramal:** A button located next to the "Perda de Carga Total" field.
- Seleção do ramal:** A section containing a dropdown menu labeled "Ramal" (marked with a red circle 4).
- Calcular:** A button located next to the "Seleção do ramal" dropdown (marked with a red circle 6).
- Table:** A table with two columns: "Nome dos semi-ramais seleccionados" and "Perda de Carga".

Nome dos semi-ramais seleccionados	Perda de Carga
Conduta Principal	2,58745402
Ramal	15,9250618
	0
	0
	0
	0
	0
	0
	0
	0
	0
	0
	0
	0
	0

 (The table is marked with a red circle 5 on the first row and a red circle 7 on the right side of the table.)

Figura 4.23 - Formulário para obtenção dos ramais completos

Seleccionados todos os conjuntos de ramais, o programa automaticamente verifica qual a perda de carga máxima na rede aerúlica.

Por último, falta dimensionar o ventilador e fazer os reajustes ao nível do equilíbrio de pressões, para facilitar o balanceamento da instalação. Inicialmente, deve-se introduzir diversos valores de caudal (em que o caudal da instalação deverá estar dentro desses valores) para o programa traçar automaticamente a equação 22, através de uma constante também calculada pela folha de cálculo (Figura 4.24). Na mesma figura, repare-se na zona em que se colocam diversos valores referentes ao ventilador. Esses valores devem ser obtidos a partir dos respectivos catálogos dos fornecedores.

Curva da Instalação		Curva do Ventilador	
Constante, k	668,83		
Pontos para desenho gráfico		Pontos para desenho gráfico	
Q (m ³ /s)	ΔH_T (m)	Q (m ³ /s)	Pe (m)
0,15	15,05	0,15	1600,00
0,3	60,19	0,3	1650,00
0,45	135,44	0,45	1610,00
0,6	240,78	0,6	1560,00
0,75	376,22	0,75	1467,00
1	668,83	1	1360,00
1,25	1045,05	1,25	1250,00
1,5	1504,87	1,5	1150,00

Figura 4.24 - Obtenção dos pontos das curvas características

No Gráfico 4.1, mostra-se o tipo de gráfico que será obtido. O ponto vermelho refere-se ao ponto de funcionamento obtido pela perda de carga total máxima e pelo caudal. A azul está traçada a curva característica da instalação, enquanto que a vermelho escuro encontra-se traçada um exemplo de uma curva de ventilador.

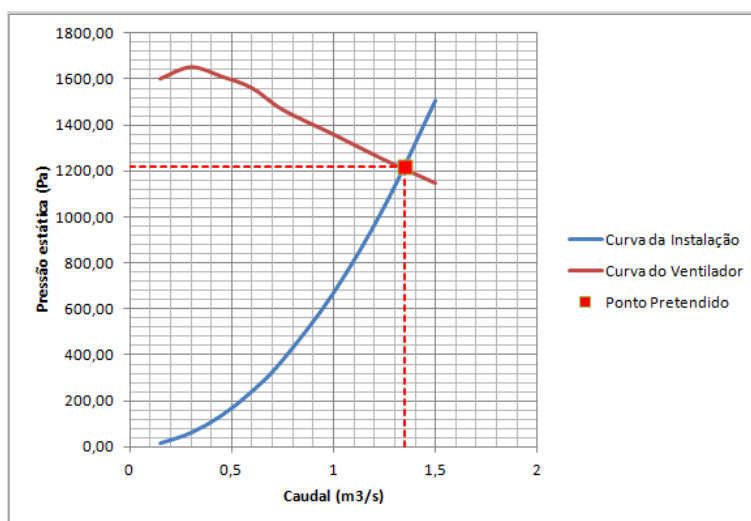


Gráfico 4.1 - Seleção do ventilador com a pressão estática em função do caudal

4.2. Método de perda de carga distribuídas por metro constante

Este método pode ser utilizado para dimensionamento de redes aeráulicas de insuflação, retorno e extracção de ar. As condutas são dimensionadas através da conservação da perda de carga (atrito viscoso)

por unidade de comprimento. Pela Figura 4.25, o objectivo será que, por exemplo, a perda de carga distribuída na secção B seja igual à de E, contudo, a normalização das dimensões das condutas não o permite. Nas condutas de secção rectangular essa igualdade será mais facilitada, contudo, nem sempre possível.

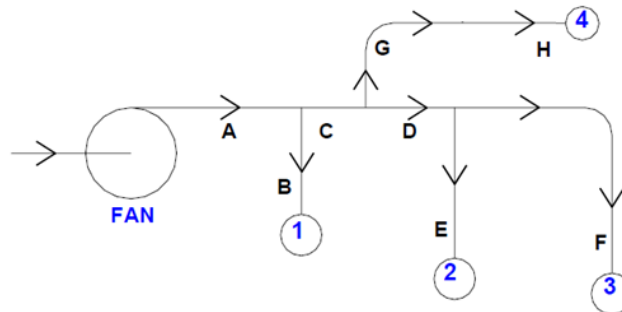


Figura 4.25 - Exemplo típico de uma rede aerúlica [11]

O procedimento a utilizar será efectuado da seguinte forma:

- i. Seleccionar a velocidade inicial na conduta principal, próximo do ventilador, sendo que esta velocidade deve ser restringida de acordo com um limite superior de ruído aconselhável;
- ii. Seleccionar o caudal de ar necessário para o objectivo da rede aerúlica em questão;
- iii. A partir da velocidade de escoamento e do caudal, obter o diâmetro equivalente para o ramo principal e respectiva perda de carga por unidade de comprimento. A obtenção do factor de atrito já é possível dado que é conhecido o caudal, velocidade, fluido e área de secção, para assim, se determinar o número de Reynolds;
- iv. Sempre que o caudal diminuir ao longo da instalação, efectuar sucessivas iterações para obter o diâmetro comercial que permita uma melhor aproximação à perda de carga anterior. O cálculo do diâmetro pode ser sugerido pela equação de Swamee e Jain [4], que propuseram uma relação explícita (equação 24) em 1976, e que apresentam uma margem de erro de cerca de 2% em relação ao diagrama de Moody;

$$D = 0,66 \cdot \left[\varepsilon^{1,25} \left(\frac{LQ^2}{g\Delta H_D} \right)^{4,75} + \nu Q^{9,4} \left(\frac{L}{g\Delta H_D} \right)^{5,2} \right]^{0,04} \quad (24)$$

- v. Determinar a perda de carga máxima de todos os ramos, somando às perdas de carga distribuídas às perdas de carga por atrito cinético, devido às curvas, forquilhas e outros acidentes geométricos;
- vi. Seleccionar a potência do ventilador de acordo com a maior perda de carga em todas as secções;
- vii. Calcular a necessidade de equilíbrio do sistema recorrendo a *dampers*.

Para facilitar o processo de dimensionamento, muitos dos dados a introduzir e a forma como são introduzidos são efectuados da mesma forma que no método anterior. Sendo assim, torna-se desnecessário explicar o processo de cálculo todo deste método. As folhas de cálculo estão representadas no anexo B, na Figura B1, Figura B2, Figura B3 e Figura B4. O esquema de funcionamento do método 2 está no anexo C, na Figura C2.

4.2.1. Introdução de dados, restrições e obtenção de resultados iniciais

A etapa inicial do método é igual ao método anterior, contudo, surge uma alteração nos resultados iniciais. É adicionada a perda de carga por metro. Esta é calculada a partir da equação 10 e utiliza como diâmetro o valor calculado com as condições iniciais de caudal e velocidade limite.

4.2.2. Dimensionamento da conduta principal

Tal como o método anterior, a etapa 1, 2, 4, 5 e 6 do capítulo 4.1.2 é semelhante, contudo o restante é diferente. No cálculo das velocidades e pressão dinâmica o processo altera-se.

Na primeira secção calcula-se a velocidade real a partir do diâmetro seleccionado (Figura 4.26 – Ponto 1). A partir destes dados, determina-se a primeira perda de carga da instalação. O utilizador pode optar por inserir no início da folha de cálculo se pretende introduzir manualmente a perda de carga por metro inerente ao projecto, contudo, caso não coloque é esta perda de carga distribuída que o programa selecciona automaticamente (Figura 4.26 – Ponto 2).

A partir daqui, o diâmetro sugerido é determinado pela equação 23 (Figura 4.26 – Ponto 3), e o utilizador deve seleccionar o diâmetro comercial que melhor corresponda ao diâmetro sugerido. Deve ter em atenção utilizar o menor número de reduções possíveis, o espaço da zona em que estarão as condutas e o posicionamento entre grelhas, no qual deve evitar colocar reduções muito próximas das grelhas, que possam alterar as condições do escoamento.

Diâmetro sugerido (mm)	Velocidade		Pd (m)	Pc/m (distribuídas)
	Velocidade Sugerida (m/s)	Velocidade real (m/s)	Pd real (m)	
378,47 3	12,00	11,85 1	7,16	0,33 2
379,80	11,21	11,15	6,34	0,29
370,64	11,04	10,46	5,57	0,26

Figura 4.26 - Determinação do diâmetro e velocidade através das perdas de carga distribuídas

4.2.3. Dimensionamento dos ramais secundários

Nos ramais secundários deve-se utilizar novamente a mesma perda de carga por metro do projecto e não deve ser calculado um novo valor de acordo com os parâmetros de caudal, diâmetro e velocidade. O processo de cálculo é igual ao método anterior.

4.2.4. Cálculo da perda de carga máxima e selecção do ventilador

Finalmente, para determinar a perda de carga máxima, deve-se seleccionar todos os ramais na folha de cálculo dos Resultados, e assim, determinar a potência de ventilador necessário para fornecer trabalho ao escoamento, tal como explicado no método anterior.

4.3. Construção e utilização da base de dados das perdas localizadas

Todos os acidentes geométricos referenciados no capítulo 3, são obtidos a partir da base de dados criada pela SMACNA. A partir das diversas tabelas dos coeficientes de perdas de carga localizadas, construiu-se uma base de dados no *Excel*, em que todos os valores de cada tipo de acidente geométrico estão guardados em folhas de *Excel* em separado.

O formulário da base de dados apresenta inicialmente todos os tipos de acidentes geométricos de uma forma geral, e que são (Figura 4.27): transições que englobam alargamentos e reduções; curvas; derivações, do tipo convergentes e divergentes; entradas e saídas de ar. Para aceder ao formulário seguinte, simplesmente deve-se clicar no tipo de acidente pretendido (botões de cor cinzento claro).

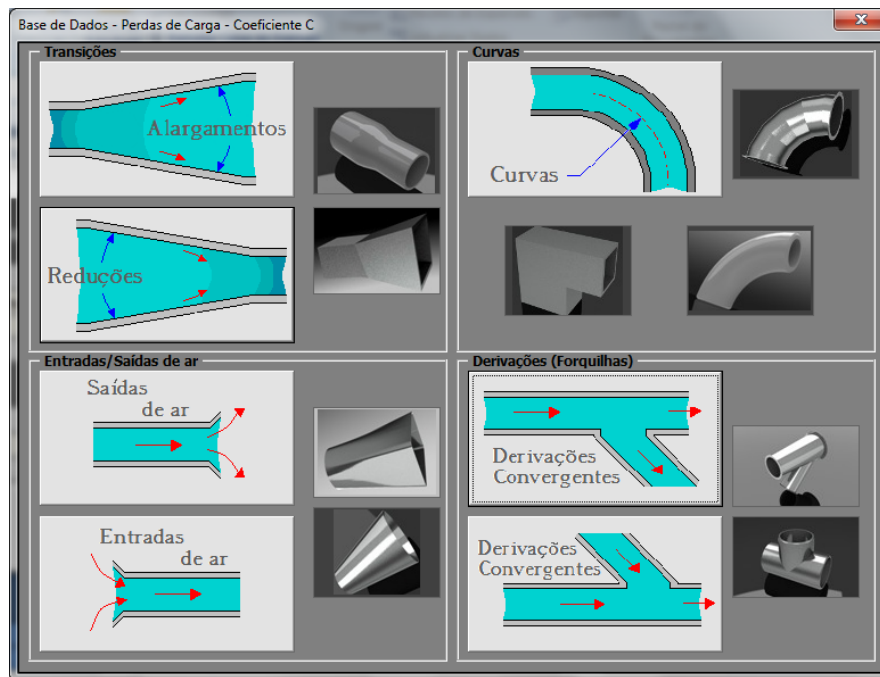


Figura 4.27 - Formulário inicial da base de dados

O processo de obtenção da perda de carga localizada é semelhante para todos os casos. Assim, apenas é necessário explicar o processo num acidente geométrico qualquer. Clicando sobre o tipo de acidente “Curvas”, abre-se uma nova janela (Figura 4.28) com os diversos tipos de curvas existentes na base de dados. Cada tipo de curva tem um código e uma breve descrição, que quando não completa, basta deixar o ponteiro do rato por cima do nome, que logo surge a descrição completa. Para adicionar uma perda de carga localizada, clica-se sobre o “botão calculadora”, e depois de determinado, surgirá na caixa referente a C_L . É possível, caso haja repetições de curvas, introduzir a quantidade daquele tipo de curva que uma determinada secção contenha.

Na zona inferior da Figura 4.28, surge uma caixa com o valor de coeficiente de perda de carga localizada presente na célula que se pretende adicionar mais um novo coeficiente. Isto é útil, pois permite somar às perdas adicionadas previamente, novas perdas de carga. Na caixa “valor do formulário” surge o somatório de todas as perdas de carga referentes às curvas adicionadas na secção seleccionada, as quais devem ser calculadas clicando em “CALC”. De seguida, para determinar a soma das perdas pré-existentes na secção com as novas adicionadas, basta clicar em “CALC” que se encontra abaixo na caixa “Valor final da célula”. Automaticamente o formulário será fechado.

Símbolo	Código	Descrição	C	Qtd.
	C1	Cilíndrica, 30°, offset		
	C2	Cilíndrica entre 0° e 180°		
	C3	Cilíndrica, gomos (3-5) - 90°		
	C4	Cilíndrica, junta de esquadria		
	C5	Rectangular, 90°, planos diferentes		
	C6	Rectangular entre 0° e 180°		
	C7	Rectangular com palhetas (1 a 3)		
	C8	Rectangular, forma em Z, 90°		
	C9	Rectangular, junta de esquadria		
	C10	Rectangular, ... palhetas móveis		

Valor inicial da célula: m

Valor final da célula: m

Valor do formulário: m **CALC**

Figura 4.28 - Perdas de carga localizadas em curvas

Pela Figura 4.28, clicando no botão referente ao código “C3”, surge um novo formulário que representa a introdução de dados e obtenção do coeficiente de perda de carga localizada de uma curva cilíndrica de 90° construída por gomos (Figura 4.29). Cada formulário, apresenta uma figura representativa do acidente geométrico que permite clarificar quais são as variáveis de entrada. Deve-se introduzir esses dados e clicar no “botão calculadora”, que automaticamente surge o valor. Este valor é determinado por intermédio de um algoritmo criado para efectuar interpolações lineares e bi-lineares, conforme o tipo de dados presentes da base de dados. Finalmente, basta clicar em “Colocar e fechar a janela” para que o software coloque o valor no formulário da Figura 4.29 e fechar a janela.

Cilíndrica, gomos (3-5) - 90°

Coeficiente de perda de carga do acessório C3

Inserir dados:

D: 0,2 m

R: 0,1 m

Nº Gomos: 5

Calcular:

Cf: 0,98

Colocar e fechar janela

Figura 4.29 - Formulário para determinação do coeficiente da curva C3

5. Comparação dos métodos desenvolvidos com um caso real

A utilização de qualquer um dos métodos de dimensionamento explicados no terceiro capítulo deve ser equacionada desde o início do projecto. Serve este capítulo para verificar qual o método mais indicado para determinadas instalações e aquele que se aproxima mais aos valores reais.

A empresa LUSITAR forneceu todos os dados relativos a uma rede aeráulica instalada num ginásio com três salas distintas, um pé direito de 2,9m e com uma área total de cerca de 226m² (Figura 5.1). O Ginásio contém uma linha de insuflação e outra de extracção, contudo, para a comparação dos métodos apenas se dimensionará para a linha de insuflação, que tem de comprimento 17m de conduta principal (a vermelho na Figura 5.1), mais 5m do ramal esquerdo (a castanho) e 14m do ramal direito (a azul escuro). Na Figura 5.1, a linha de insuflação encontra-se a verde e percorre as 3 salas. De salientar, que da passagem da sala 1 para as outras duas salas, encontra-se uma derivação na sala 2, que permite o acesso do caudal de ar a esta sala e também à sala 3. Todos os acidentes geométricos existentes na instalação serão enunciados mais à frente.

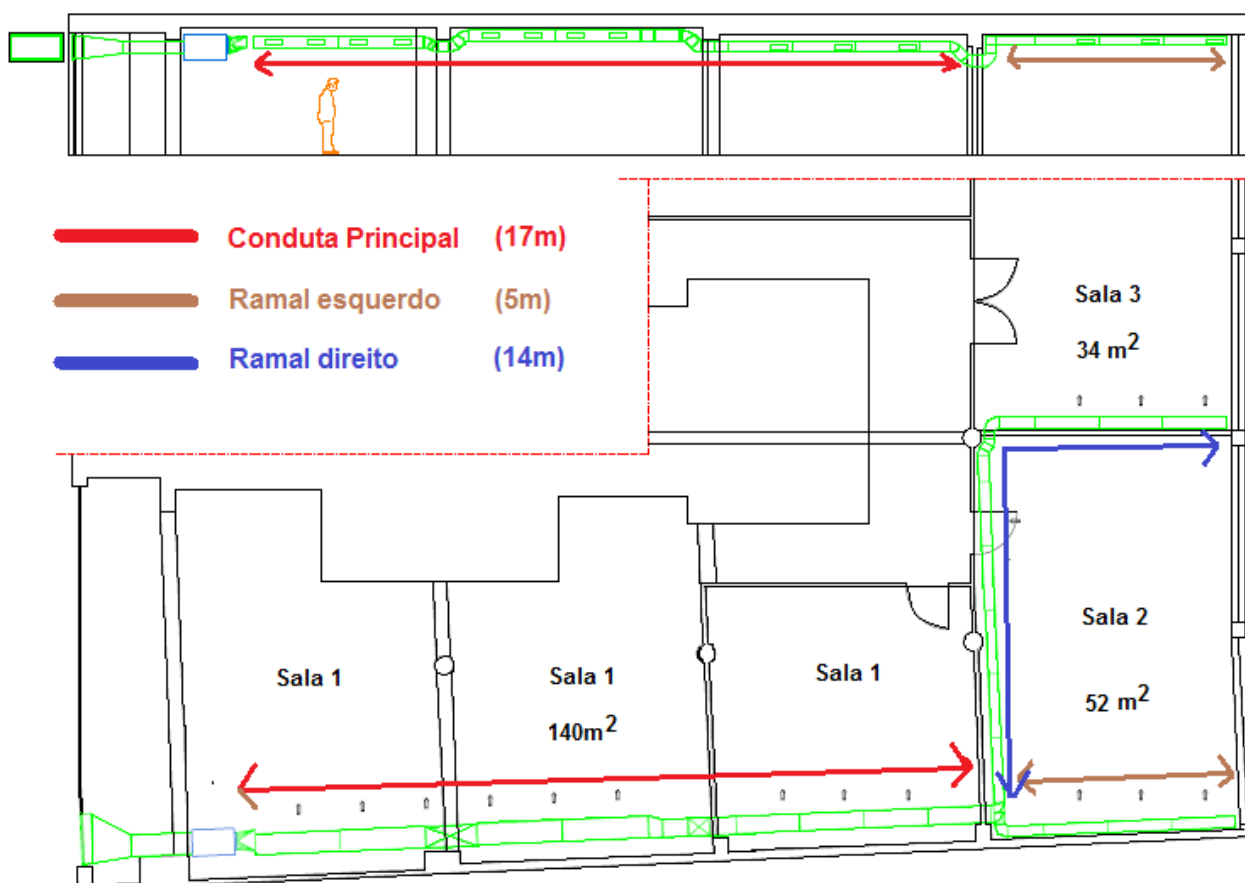


Figura 5.1 - Planta do ginásio e linha de insuflação

Como primeiro passo efectuou-se medições no Ginásio através de um tubo pitot, de forma a medir todas as pressões em jogo: pressão total, estática e dinâmica. Os resultados são descritos neste capítulo quando comparados com os valores obtidos com os dois métodos de dimensionamento.

5.1. Aplicação do método 1

Todo o processo/algorithmo de dimensionamento explicado no capítulo 4.1, será aplicado no dimensionamento da rede de ventilação do Ginásio. De seguida, será efectuada a comparação com os valores reais e também com valores de delimitação de velocidade diferentes.

5.1.1. Introdução de dados e selecção das grelhas de insuflação

O primeiro passo efectuou-se introduzindo os dados iniciais na folha de cálculo, e que coincidiram com os utilizados na folha de cálculo da empresa no dimensionamento (Figura 5.2). O caudal de insuflação é de 4860 m³/h, e a velocidade limite na linha, e que se utiliza para determinar o primeiro diâmetro da instalação foi de 12 m/s.

Dados, restrições - Dimensionamento da linha		
Caudal de insuflação/extracção	4860	m ³ /h
Velocidade limite na linha	12	m/s
Delimitação da redução de velocidade	4	m/s


Figura 5.2 - Dados iniciais para dimensionamento da rede aeráulica do Ginásio

Relativamente à delimitação do valor em que é permitido reduzir a velocidade na instalação, introduzindo-se 4 m/s. Contudo, no final deste subcapítulo serão debatidos os resultados com valores de 6, 8 e 10m/s. De salientar, que este valor pode também depender do nível de ruído permitido dependendo da localização da instalação. O material das condutas da instalação é um aço galvanizado com uma rugosidade de 0,00015m.

O sistema de ventilação do Ginásio contém 17 grelhas no total. O caudal total que é insuflado nestas grelhas coincide com o valor do caudal introduzido no início da instalação. A partir desse valor e da velocidade requerida nas grelhas (entre 2 e 3 m/s), obteve-se uma área total de grelhas de 0,45 m². Através do catálogo da *France-Air* seleccionou-se uma grelha igual à da instalação, até para facilitar a comparação

dos métodos. Assim, a grelha seleccionada tem de dimensões 300mm de comprimento por 100mm de altura, o que perfaz uma área total de grelhas de $0,51\text{m}^2$ (valor próximo do teórico calculado). A perda de carga fornecida pelo fabricante é de 18,35Pa. Todos estes valores encontram-se na Figura 5.3.

Seleção de Grelhas/Difusores

☒ Grelhas 

Caudal total neste tipo de grelhas	4860	m^3/h
Velocidade requerida nas grelhas	3	m/s
Nº de grelhas	17	qtd.
Secção da grelha seleccionada	A	B
	300	100
Área de grelhas	0,45	m^2
Área efectiva de cada grelha	0,51	m^2
Velocidade efectiva de cada grelha	2,65	m/s
Caudal por grelha	0,0794	m^3/s
Perda de carga (dada pelo fornecedor)	18,35	Pa

Nº	Lista de grelhas	Qtd.	Caudal (m^3/s)	ΔH (m)
1	Grelha 300*100	17	0,08	1,55335

Figura 5.3 - Seleção das grelhas de insuflação

5.1.2. Dimensionamento da conduta principal

A sala 1 é percorrida pela conduta principal, mas, para além desta, existem dois ramais secundários originados pela derivação (forquilha). Para isso, foram criados no programa dois ramais secundários, como foi explicado no subcapítulo 4.1.1, com os nomes ramal esquerdo e ramal direito.

No que concerne ao dimensionamento da conduta principal (Tabela 5.1), com um comprimento de cerca de 17m, foram criadas 12 secções, tendo por base na sua criação, a alteração do caudal. Até final da conduta principal existem 11 grelhas, o que equivale a onze alterações de caudal, mais uma referente à secção anterior à derivação.

Foi seleccionada por este método a mesma secção rectangular de conduta de saída do ventilador que na instalação real. Através do caudal inicial e da velocidade limite obteve um diâmetro teórico de 0,38m. Sendo assim, utilizou-se como conduta de saída uma secção de 500mm de largura por 250mm de altura, o que perfaz um diâmetro equivalente de 0,381m, um pouco acima do teórico. Neste ponto, a velocidade real é de 11,85 m/s, e, a partir daqui, o seu valor terá que diminuir ao longo das secções até chegar ao valor de 4

m/s, tal como foi delimitado na introdução dos dados iniciais. Refira-se que, utilizando as dimensões da conduta de 500mm por 250mm até à derivação a velocidade, nunca foi inferior a 4 m/s, por isso, não foi utilizada nenhuma redução até aquele ponto da instalação.

Tabela 5.1 - Valores mais importantes dos resultados no dimensionamento da conduta principal

Secção	Nº ou L	Caudal (m³/s)	D. Eq (mm)	Velocidade real (m/s)	Pd real (m)	Diâmetro sugerido (mm)	Velocidade Sugerida (m/s)
1	1	1,35	381	11,85	7,16	378	11,85
2	1	1,27	381	11,15	6,34	381	11,15
3	1	1,19	381	10,46	5,57	381	10,46
4	1	1,11	381	9,76	4,85	381	9,76
5	1	1,03	381	9,06	4,19	381	9,06
6	1	0,95	381	8,37	3,57	381	8,37
7	1	0,87	381	7,67	3,00	381	7,67
8	1	0,79	381	6,97	2,48	381	6,97
9	1	0,71	381	6,27	2,01	381	6,27
10	1	0,64	381	5,58	1,59	381	5,58
11	1	0,56	381	4,88	1,21	381	4,88
12	0	0,48	381	4,18	0,89	381	4,18

Relativamente às perdas de carga da conduta principal, os resultados relativos às perdas de carga distribuídas, encontram-se listadas na Tabela 5.2. Para o seu cálculo apenas necessitou-se na introdução dos comprimentos de cada secção da conduta principal, obtendo-se um total de perdas de carga distribuídas na conduta principal de 5,25 metros coluna de ar.

Tabela 5.2 - Perdas de carga distribuídas na conduta principal

Comprimento (m)	Reynolds	factor de atrito (f)	Pc Distribuídas (m)
1,267	300888	0,0143	0,57
1	283189	0,0145	0,42
1	265490	0,0147	0,40
1	247790	0,0149	0,38
1,85	230091	0,0151	0,66
1	212392	0,0153	0,34
1	194692	0,0156	0,31
1	176993	0,0159	0,29
3,83	159294	0,0162	1,02
1	141594	0,0166	0,24
1	123895	0,0171	0,22
2,053	106196	0,0176	0,40

No que concerne às perdas de carga localizadas, ao longo da conduta principal existem diversos acidentes geométricos que são referenciados na Tabela 5.3. Todos eles foram calculados recorrendo à base de dados das perdas localizadas existentes na folha de cálculo.

Tabela 5.3 - Acidentes geométricos na conduta principal e seu coeficiente de perda de carga

Secção	Descrição	Dimensões	C_f
1	Transformação circular para rectangular (Qtd – 1)	D=405mm H=250mm; W=500mm	0,18
5	Curva rectangular, 30° (Qtd – 2)	R=100mm H=250mm; W=500mm	0,63
5,9 e 12	Curva rectangular, 45° (Qtd – 6)	R=100mm H=250mm; W=500mm	0,84
12	Curva rectangular, 90° (Qtd – 1)	R=75mm H=250mm; W=500mm	1,4
12	Derivação divergente, secção rectangular (Qtd – 1)	R = 50mm H=250mm; W=500mm H1=250mm; W1=200mm	0,3

Note-se a grande influência dos acidentes geométricos numa rede aeráulica nos valores das perdas de carga localizadas (Tabela 5.4). No total são cerca de 50 metros coluna de ar a somar às restantes perdas. Juntamente com as perdas relativas às grelhas e às perdas distribuídas perfaz no total uma perda de carga de 72,29m.c.ar.

Tabela 5.4 - Perdas de carga localizadas e totais na conduta principal

Coeficiente C	Pc Localizadas (m)	Pc Loc. Grel/Dif.	Pc L Total	Pc Total (m)
0,18	2,13	1,55	3,69	4,25
	0,00	1,55	1,55	1,98
	0,00	1,55	1,55	1,96
	0,00	1,55	1,55	1,93
2,94	26,64	1,55	28,20	28,86
	0,00	1,55	1,55	1,89
	0,00	1,55	1,55	1,87
	0,00	1,55	1,55	1,84
1,68	10,54	1,55	12,09	13,12
	0,00	1,55	1,55	1,80
	0,00	1,55	1,55	1,77
2,54	10,62	0,00	10,62	11,02

5.1.3. Dimensionamento dos ramais secundários

Posteriormente, surge o dimensionamento dos ramais. Quer o ramal direito, quer o ramal esquerdo contém três grelhas, apresentando necessidade de caudal de ar iguais. Como o caudal à entrada da derivação é de $0,48\text{m}^3/\text{s}$, então, o caudal inicial em cada ramal é metade. Apenas apresenta três secções já que apenas tem três grelhas. O diâmetro seleccionado é de 250mm por 150mm. Pela Tabela 5.5, note-se que a velocidade real cai para baixo dos 4m/s , contudo, será desnecessário utilizar-se uma conduta de menores dimensões de forma a evitar o uso de mais reduções, mas também porque a grelha tem 100mm de altura, já estando no limite utilizar-se 150mm de altura de conduta.

Tabela 5.5 - Valores mais importantes dos resultados no dimensionamento do ramal esquerdo

Secção	Caudal (m^3/s)	Diâmetro sugerido (mm)	Velocidade Sugerida (m/s)	Pd Sugerida (m)	Velocidade real (m/s)	Pd real (m)
1	0,24	209,990	6,93	2,45	6,93	2,45
2	0,16	209,990	4,64	1,10	4,64	1,10
3	0,08	160,746	4,00	0,82	2,34	0,28

O ramal da esquerda contém duas perdas de carga localizadas para além das grelhas. A originada pela derivação (perda a jusante) e por uma curva de 90° (Tabela 5.6).

Tabela 5.6 - Acidentes geométricos no ramal esquerdo e seu coeficiente de perda de carga

Secção	Descrição	Dimensões	C _f
1	Derivação divergente, secção rectangular (Qtd – 1)	R = 50mm H=250mm; W=500mm H1=250mm; W1=200mm	0,3
1	Curva rectangular, 90° (Qtd – 1)	R=50mm H=150mm; W=250mm	1,36

O comprimento total deste ramal é de 5,7m. Em termos de perdas de carga distribuídas perfaz um total de 2.63m.c.ar. Relativamente às perdas de carga localizadas da Tabela 5.7 mais as devidas às grelhas de insuflação totaliza, juntamente com as distribuídas, uma perda de carga total de 18,79m.c.ar.

Tabela 5.7 - Perdas de carga do ramal esquerdo

Comprimento (m)	Pc Distribuídas (m)	Pc L Total (m)	Pc Total (m.c.ar)
2,7	1,60	13,06	14,66
1,5	0,65	1,55	2,20
1,5	0,38	1,55	1,94

No que concerne ao ramal direito, uma vez que o caudal que nele circule é o mesmo do ramal esquerdo seleccionou-se a mesma secção da conduta (250x150). Sendo assim, os dados da Tabela 5.8 são os mesmos do que os obtidos neste ramal. A única diferença surge nos acidentes geométricos. Este ramal contém para além da derivação, duas curvas de 30° e uma curva de 90° (Tabela 5.8).

Tabela 5.8 - Acidentes geométricos no ramal direito e seu coeficiente de perda de carga

Secção	Descrição	Dimensões	C _r
1	Derivação divergente, secção rectangular (Qtd – 1)	R = 50mm H=250mm; W=500mm H1=250mm; W1=200mm	0,3
1	Curva rectangular, 30° (Qtd – 2)	R=100mm H=150mm; W=250mm	0,61
1	Curva rectangular, 90° (Qtd – 1)	R=50mm H=150mm; W=250mm	1,36

O comprimento total do ramal direito é de 12m, pois apresenta uma longa conduta (9m) sem qualquer tipo de grelha. A diferença entre os dois ramais, e que torna este, o ramal com maior perda de carga, surge logo na secção 1, devido à maior quantidade de acidentes geométricos presentes nessa secção. No total de perdas distribuídas obteve-se 6,36m.c.ar, enquanto que de perdas localizadas atingiu-se 20,38m.c.ar. Somando estas duas parcelas, a perda de carga total do ramal direito é de 26,75 metros coluna de ar (Tabela 5.9).

Tabela 5.9 - Perdas de carga do ramal direito

Comprimento (m)	Pc Distribuídas (m)	Pc L Total (m)	Pc Total (m)
9	5,33	17,28	22,61
1,5	0,65	1,55	2,20
1,5	0,38	1,55	1,94

5.1.4. Selecção do Ventilador

Activando o botão “Adicionar conjunto de ramais”, selecciona-se dois conjuntos de ramais: conduta principal + ramal esquerdo; conduta principal + ramal direito. Na Figura 5.4, verifica-se que o ramal número 1 é o mais desfavorável, e é essa perda total que o ventilador terá que vencer. Contudo, o ramal número 2 não se pode descurar, uma vez que é necessário calcular a introdução de perda de carga por *dampers* necessário ao equilíbrio da instalação.

Nº	Descrição do Ramal	ΔH (m)	Eq.pressão (m)
1	CP + Ram Esq	91,08	15,24
2	CP + Ram Dir	99,04	7,28

Figura 5.4 - Conjunto de ramais mais desfavorável no método 1

O ponto de pretendido é de $1,35\text{m}^3/\text{s}$ para uma pressão estática de 1170Pa . Através da equação 22, obtém-se a curva da instalação inicial (Gráfico 5.1) e sobre ela automaticamente surge o ponto pretendido. Colocando diversos valores para uma curva de um ventilador que se enquadra na curva da instalação, a intersecção ocorre para um caudal de $1,43\text{m}^3/\text{s}$ e uma pressão estática de 1320Pa . Este seria o ponto de funcionamento caso não fosse pretendido ajustar o caudal. Contudo, para efeito de comparação de métodos, para o caudal de $1,35\text{m}^3/\text{s}$, a pressão estática seria de 1305Pa (Gráfico 5.1). Na Figura 5.4, encontram-se os valores de perda de carga a adicionar para balancear toda a rede aerúlica. A potência do ventilador seleccionado é de $2,4\text{kW}$.

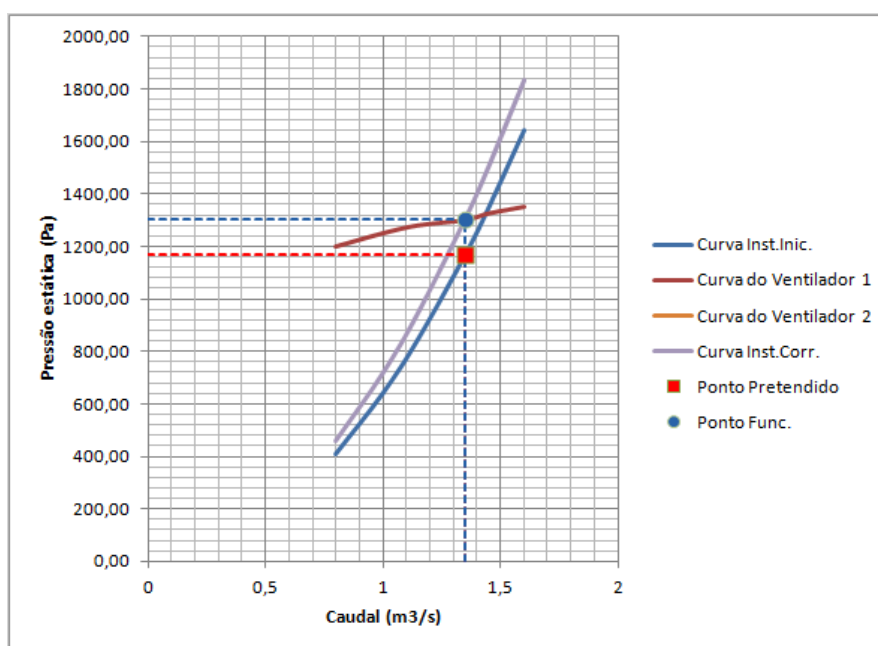


Gráfico 5.1 - Selecção do ventilador pelo método 1

Para comparar este método com outra delimitação de velocidade, obteve-se outro dimensionamento em que a velocidade referida é de 10m/s , foram seleccionados quatro diâmetros diferentes, a perda de carga máxima é de $137,91\text{m.c.ar}$, a potência do ventilador é de $3,14\text{kW}$ e a correcção de perda de carga aplicada ao ramal 2 é igual à anterior, ou seja, de 2m.c.ar .

5.2. Aplicação do método 2

Tal como no capítulo 5.1, serve este subcapítulo para aplicar o método 2 explicado no capítulo 4.2.

5.2.1. Introdução de dados e selecção das grelhas de insuflação

Todo o processo de introdução de dados e selecção das grelhas é independente do tipo método utilizado. Por isso, todos os dados, à excepção do valor da delimitação da velocidade, são iguais aos referenciados no capítulo 5.1.1.

5.2.2. Dimensionamento da conduta principal

Tal como foi referido anteriormente, a instalação contém dois ramais distintos para além da conduta principal. Como o nome do próprio método dá a entender, a criação de secções é feita por metro. Sendo assim, nesta instalação como a conduta principal tem cerca de 17m, foram criadas 17 secções. O cálculo do diâmetro de saída do ventilador procede-se da mesma forma que no método 1. A manutenção da perda de carga distribuída por metro constante ao longo da conduta é impraticável, uma vez que seria necessário introduzir diversas vezes reduções de secção na conduta de forma a estabilizar esse valor. Por exemplo, numa primeira zona da instalação existem quatro grelhas seguidas e separadas por apenas um metro. Não seria muito adequado utilizar-se uma redução entre essas grelhas. Por isso, torna-se essencial o utilizador adoptar a redução conforme a configuração da instalação, para além do objectivo do método. Neste exemplo, a partir dos dados iniciais obteve-se uma perda de carga por metro de 0,33m.c.ar (Tabela 5.10 – Secção 1). Ao longo da conduta principal procede-se a três reduções: na secção 5 a queda de perda de carga por metro é de cerca de 30% em relação ao ponto 1 e para impedir a utilização de uma redução entre grelhas, coloca-se posteriormente à grelha 4 uma secção de 400mm por 250mm. O mesmo acontece na secção 10, com a utilização de uma secção de 300mm por 250mm, de forma a obter-se novamente a perda de carga por metro pré-estabelecida de 0,33m.c.ar. De salientar, que ao longo da conduta o valor desta perda não ultrapassa os 0,8Pa/m (valor recomendado). O total de perdas de carga distribuídas através deste método é de 4,51m.c.ar.

Tabela 5.10 – Valores mais importantes dos resultados no dimensionamento da conduta principal

Secção	Nº ou L	Caudal (m³/s)	D.Eq (mm)	Diâmetro sugerido (mm)	Velocidade Sugerida (m/s)	Velocidade real (m/s)	Pd real (m)	Pc/m (distribuídas)
1	1	1,35	381	378	12,00	11,85	7,16	0,33
2	1	1,27	381	380	9,68	11,15	6,34	0,29
3	1	1,19	381	370	9,53	10,46	5,57	0,26
4	1	1,11	381	361	9,37	9,76	4,85	0,23
5	0	1,03	343	351	9,21	11,15	6,34	0,33
6	1	1,03	343	351	9,21	11,15	6,34	0,33
7	1	0,95	343	341	9,03	10,29	5,40	0,28
8	1	0,87	343	330	8,84	9,44	4,54	0,24
9	1	0,79	343	318	8,64	8,58	3,75	0,20
10	0	0,71	299	305	8,42	10,17	5,28	0,33
11	0	0,71	299	305	8,42	10,17	5,28	0,33
12	1	0,71	299	305	8,42	10,17	5,28	0,33
13	0	0,64	299	292	8,18	9,04	4,17	0,26
14	1	0,64	299	292	8,18	9,04	4,17	0,26
15	1	0,56	299	278	7,92	7,91	3,19	0,20
16	0	0,48	299	262	7,63	6,78	2,34	0,15
17	0	0,48	299	262	7,63	6,78	2,34	0,15

Em termos de perdas de carga localizadas, as únicas diferenças em relação ao outro método consistem na introdução de duas reduções na conduta principal e as dimensões de diversos acidentes geométricos. Todos os coeficientes de perdas de carga localizadas foram determinados a partir da base de dados do programa (Tabela 5.11).

Tabela 5.11 - Acidentes geométricos na conduta principal e seu coeficiente de perda de carga

Secção	Descrição	Dimensões	C_f
1	Transformação circular para rectangular (Qtd – 1)	D=405mm H=250mm; W=500mm	0,18
4	Curva rectangular, 30° (Qtd – 2)	R=100mm H=250mm; W=500mm	0,63
5	Curva rectangular, 45° (Qtd – 2)	R=100mm H=250mm; W=500mm	0,84
5	Redução rectangular concêntrica (Qtd =1)	H1=250mm; W1=500mm H=250mm; W=400mm	0,05
10	Redução rectangular concêntrica (Qtd =1)	H1=250mm; W1=400mm H=250mm; W=300mm	0,05
10, 11 e 17	Curva rectangular, 45° (Qtd – 4)	R=100mm H=250mm; W=300mm	0,76
17	Curva rectangular, 90° (Qtd – 1)	R=75mm H=250mm; W=300mm	1,27
17	Derivação divergente, secção rectangular (Qtd – 1)	R = 50mm H=250mm; W=300mm H1=250mm; W1=150mm	0,3

Os valores da Tabela 5.12 são referentes apenas às secções que contêm perdas de carga localizadas, contudo, nas restantes secções também são contabilizadas as perdas originadas pelas grelhas de insuflação. No total, as perdas de carga localizadas são de 49,83m.c.ar, o que totaliza, em perdas de carga totais, 54,22m.c.ar.

Tabela 5.12 - Perdas de carga localizadas e totais na conduta principal

Secção	Coeficiente C	Pc Localizadas (m)	Pc Loc. Totais	Pc Total (m)
1	0,18	1,29	1,55	3,17
4	1,26	6,12	1,55	7,90
5	1,73	10,96	0,00	11,29
10	0,76	2,85	1,55	4,60
11	0,81	4,27	0,00	4,60
17	3,09	7,25	0,00	7,40

5.2.3. Dimensionamento dos ramais secundários

No dimensionamento dos ramais secundários, em ambos o diâmetro seleccionado é de 250mm por 150mm. Sendo assim, a única alteração geométrica é a localização dos acidentes geométricos ao longo dos ramais. O ramal esquerdo contém 5 secções (cerca de 5m de comprimento), já o ramal direito contém 14 secções (cerca de 14m de comprimento). Devido a essas alterações, o valor das perdas de carga localizadas são diferentes. Neste caso, no ramal esquerdo a perda de carga total é de 11,99m.c.ar, enquanto que no ramal direito essa perda é de 17,26m.c.ar.

5.2.4. Selecção do ventilador

Premindo o botão “Adicionar conjunto de ramais”, selecciona-se os conjuntos de ramais e procede-se à determinação da perda de carga total máxima. Note-se, pela Figura 5.5, que o ramal número 2 é o mais desfavorável, e é essa perda total que o ventilador terá que vencer.

Nº	Descrição do Ramal	ΔH (m)	Eq. pressão (m)
1	CP + Ram Esq	66,32	7,83
2	CP + Ram Dir	71,60	2,56

Figura 5.5 - Conjunto de ramais mais desfavorável no método 2

A partir do caudal de $1,35 \text{ m}^3/\text{s}$ e a perda de $71,6 \text{ m.c.ar}$ (ponto pretendido), obtém-se a curva da instalação inicial. Coloca-se também os pontos necessários ao desenho da curva do ventilador e, assim, determina-se o ponto de funcionamento, o qual deverá ser corrigido para que a instalação trabalhe ao caudal pretendido. Com recurso à curva do ventilador fornecida pelos fabricantes e pelo Gráfico 5.2, determina-se o ponto de funcionamento corrigido (ponto azul no Gráfico 5.2), tendo em conta a necessidade de variação do valor da pressão para corrigir o caudal para $1,35 \text{ m}^3/\text{s}$. A potência do ventilador é de $1,75 \text{ kW}$.

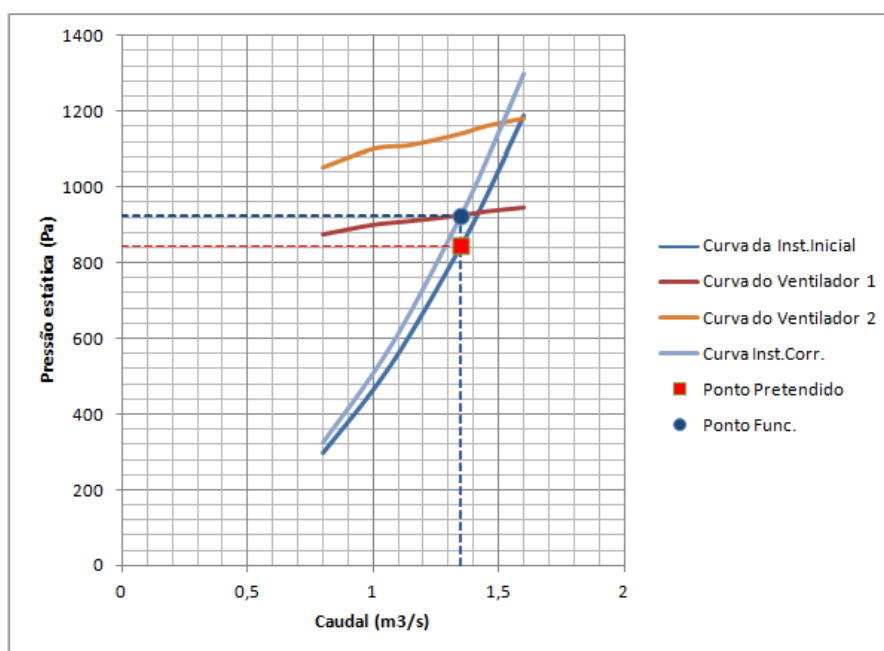


Gráfico 5.2 - Selecção do ventilador

Contudo, os ramos devem ser equilibrados em termos de pressão. É necessário calcular a introdução de perda de carga por *dampers* necessário ao equilíbrio da instalação. Para isso, é necessário subtrair a perda de carga total (pressão estática à saída do ventilador) já contabilizada com a perda de outros componentes que dependiam da selecção do ventilador, que neste caso é um filtro, pela perda em cada ramal (Figura 5.5). Por último, como o filtro utilizado depende da caixa de ventilação seleccionada, verifica-se se o valor total da perda de carga é inferior ao do ponto de funcionamento. Neste caso sim, já que a pressão estática do ventilador é de 925 Pa e a perda de carga total, inclusive com o filtro, é de 894 Pa .

5.3. Comparação entre os métodos 1 e 2

Serve este capítulo para comparar os resultados de ambos os métodos e verificar quais as vantagens e desvantagens dos mesmos. Para além disso, no método de redução de velocidade com posterior pressão

dinâmica constante, resta saber qual a influência no dimensionamento da instalação caso se introduza uma delimitação maior à velocidade pela qual a pressão deverá ser constante.

5.3.1. Comparação entre diferentes delimitações de velocidade do método 1

Na Tabela 5.13, encontram-se listados os resultados relativos às dimensões utilizadas no dimensionamento da instalação e a respectiva potência necessária para vencer as perdas de cargas. Verifica-se pelos resultados que a alteração da velocidade à qual a redução de velocidade é limitada, permite obter uma maior diversidade de dimensões de conduta e de dimensões mais reduzidas, contudo, a potência do ventilador é sempre maior, pois a pressão dinâmica aumenta. Deduz-se, assim, que o aumento da velocidade escolhida, permite obter as condutas por preços mais baixos, contudo, os ventiladores são mais caros. Resta ao utilizador realizar um balanço do preço final comparando os diversos resultados. Todavia, a utilização deste aumento de velocidade deve ser permitido já que em diversos tipos de instalações existem diversos níveis máximos de pressão sonora permitidos. A utilização deste método, por exemplo, numa instalação industrial poderá ser o mais indicado.

Tabela 5.13 - Dados obtidos para diferentes velocidades de redução

Velocidade escolhida (m/s)	Condutas seleccionadas (mm)	Potência necessária (kW)
4	500x250;250x150	2,4
6	500x250;300x250;200;150	2,7
8	500x250;300x250;200x150	2,7
10	500x250;350x250;300x200;150x150	3,24

Relativamente aos dois métodos, interessa comparar os parâmetros em que cada método se procuram manter constantes e todas as perdas de carga envolvidas. Para comparação dos dados, apenas utilizou-se os referentes à conduta principal da instalação aeráulica do ginásio.

5.3.2. Comparação da pressão dinâmica ao longo da instalação

A pressão dinâmica é o parâmetro pelo qual o dimensionamento é realizado no método 1. No Gráfico 5.3, estão evidenciadas características deste método:

- a) A pressão dinâmica total é maior em casos de delimitação mais elevada. Neste caso, para 10m/s;

- b) Quanto menor a delimitação de velocidade menores reduções dimensionais ocorrerá nas condutas. Para 4m/s, na conduta principal, nunca se procedeu à redução da conduta, todavia, para 10m/s, efectuou-se três reduções de diâmetro, de forma a recompor a pressão dinâmica;
- c) A amplitude de variação da pressão dinâmica ao longo da conduta é mais baixa para casos de velocidades mais elevadas.

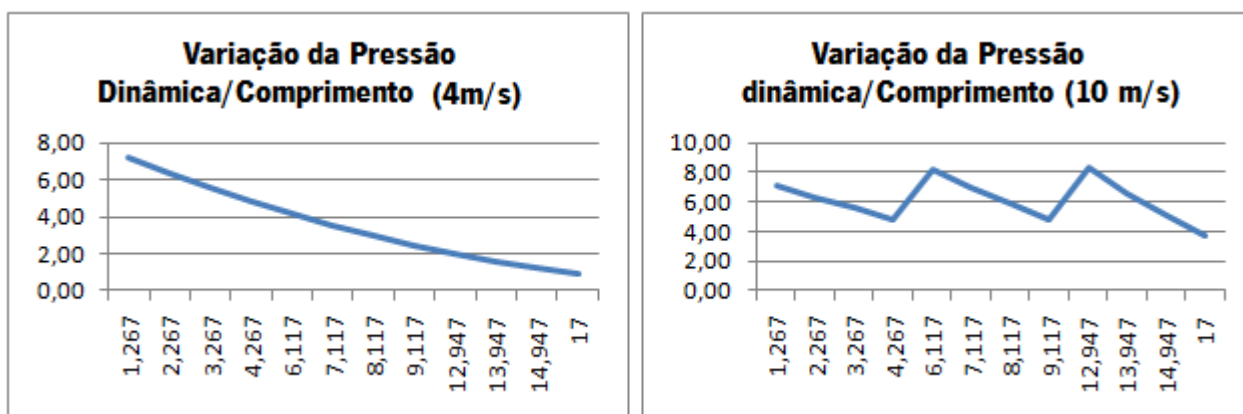


Gráfico 5.3 - Variação da pressão dinâmica ao longo da conduta principal (mét.1), para 4 e 10 m/s

No que respeita ao método 2, a pressão dinâmica apresenta pouca importância, contudo pode-se verificar quais as diferenças para o método 1 (Gráfico 5.4):

- a) Comparando com o método 1 com delimitação de velocidade 4m/s, apresenta uma normal menor variação da pressão dinâmica, já que se procedeu a reduções de conduta, ao contrário do primeiro caso;
- b) Comparando com o método 1 com delimitação de velocidade de 10m/s, a variação já se torna mais evidente, e atinge valores mínimos bastante mais reduzidos que o método 1. Também se atingem picos de pressão dinâmica maiores que no método 2.

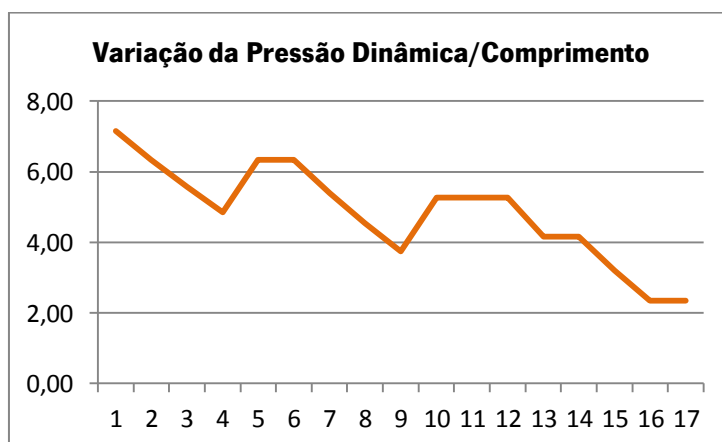


Gráfico 5.4 - Variação da pressão dinâmica ao longo da conduta principal (mét.2)

5.3.3. Comparação das perdas de carga distribuídas

No caso do método 2, o parâmetro pelo qual o método se baseia é a perda de carga distribuída. Contudo, o seu cálculo também é realizado no outro método, para determinar as perdas totais. No Gráfico 5.5, verifica-se os seguintes pontos:

- Devido às velocidades superiores encontradas, as perdas distribuídas são superiores na delimitação da velocidade a 10m/s. Sempre que ocorre um pico percebe-se bem essa diferença;
- O pressuposto na alínea anterior, resulta da utilização de diâmetros de menores dimensões no segundo caso;
- A amplitude de variação da perda de carga distribuída é menor no caso em que a delimitação da velocidade é menor.

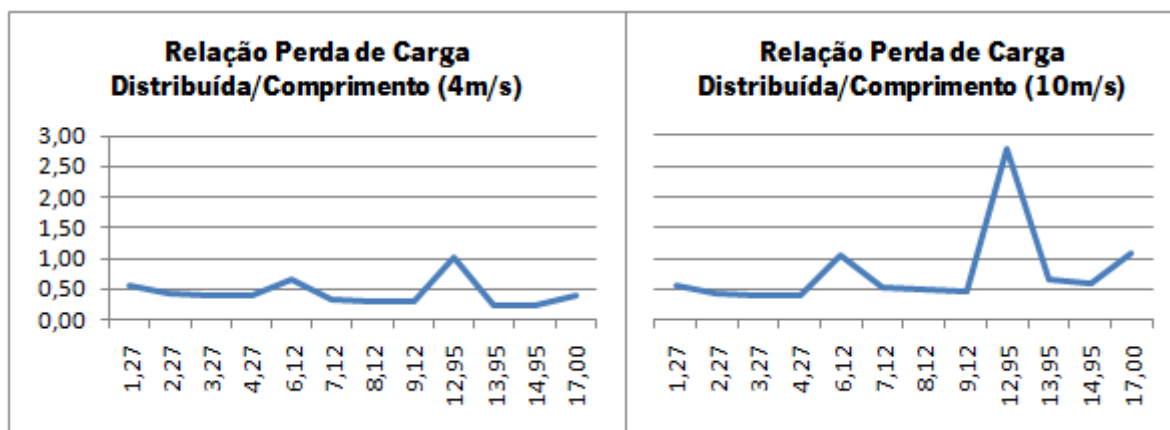


Gráfico 5.5 - Variação da perda de carga distribuída ao longo da conduta principal (mét.1)

Relativamente ao segundo método, é expectável que o valor da perda de carga distribuída seja mais uniforme. Dos resultados da instalação, na conduta principal, verificou-se, pelo Gráfico 5.6:

- Variação da perda de carga distribuída mais ou menos constante, sem picos de relevo durante a conduta principal;
- Variação de maior semelhança em relação ao caso 1 do primeiro método.

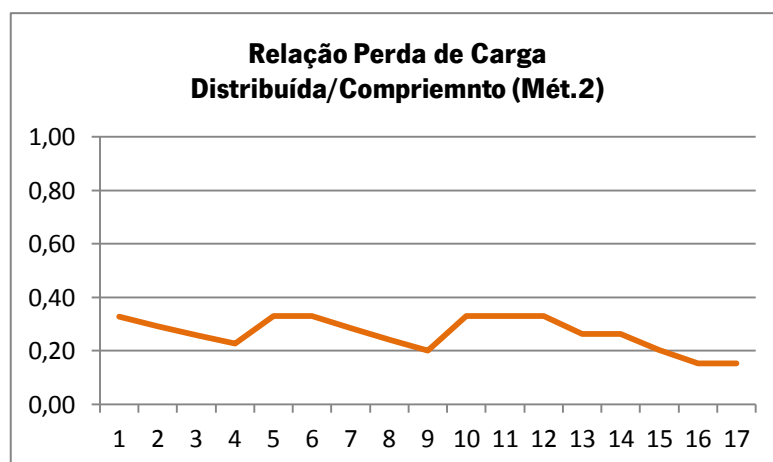


Gráfico 5.6 - Variação da perda de carga distribuída ao longo da conduta principal (mét.2)

5.3.4. Comparação entre perdas de carga distribuídas e localizadas

Numa rede aeráulica, as maiores perdas de carga são relativas às originadas pelos acidentes geométricos. O perfil das linhas no Gráfico 5.7, é semelhante, contudo, os picos apresentam maiores amplitudes, devido às maiores velocidades no escoamento de ar, em que a delimitação é 10m/s. Como todas as secções têm acidentes geométricos, as perdas de carga localizadas são sempre superiores às distribuídas. A amplitude de variação das perdas localizadas é maior no caso em que a delimitação de velocidade é de 10m/s.

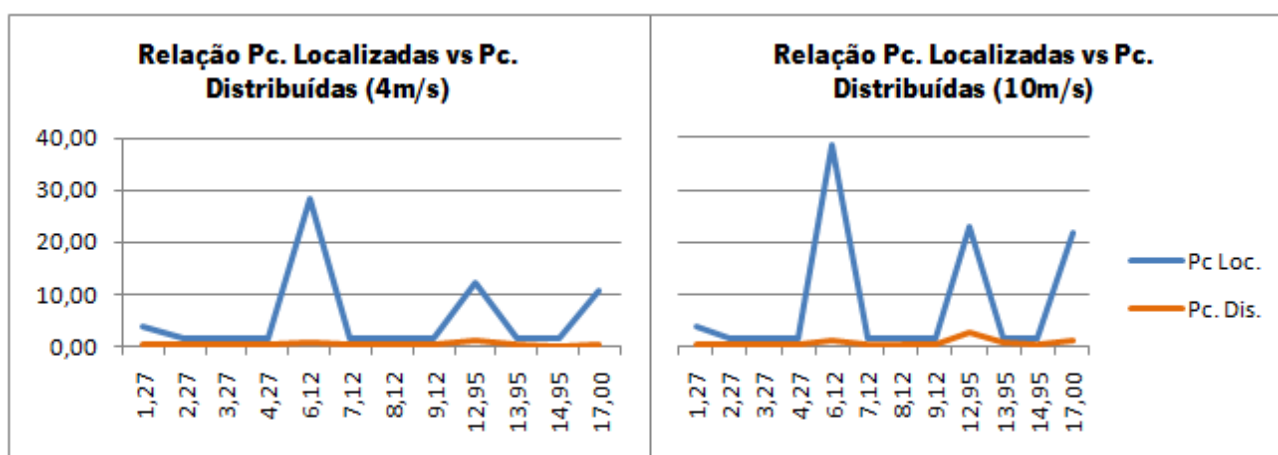


Gráfico 5.7 - Perdas de carga distribuídas e localizadas e sua relação (mét.1)

No método da perda de carga distribuída constante, tal como no método anterior, as perdas distribuídas são inferiores às localizadas. Através do Gráfico 5.7 e Gráfico 5.8, podem verificar-se os seguintes aspectos:

- a) No método 1, as perdas localizadas são sempre superiores às perdas distribuídas, enquanto que no método 2, nem sempre isso acontece, pois existem secções sem grelhas de insuflação;
- b) Os picos de perdas localizadas ocorrem em momentos diferentes devido ao número de secções ser diferente. Como o método 2 apresenta uma maior quantidade de secções, apresenta maiores quantidades de picos e de valor mais baixo que no método 1;

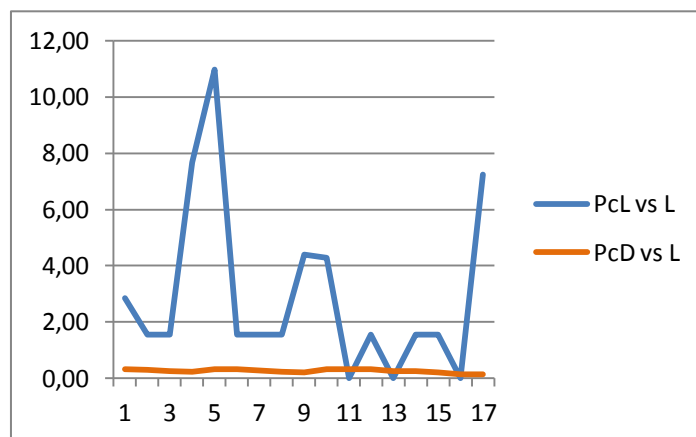


Gráfico 5.8 - Perdas de carga distribuídas e localizadas e sua relação (mét.2)

5.3.5. Comparação entre as perdas de carga totais

Finalmente, o último parâmetro de comparação é relativo à perda de carga total. No caso do método 1, é espectável que a perda total seja inferior para o caso de delimitação a 4m/s. Os picos de perda de carga total encontram-se nas mesmas secções, sendo a única diferença a sua intensidade, que é superior no caso em que a delimitação é 10m/s e, consequentemente, a amplitude de variação é maior (Gráfico 5.9).

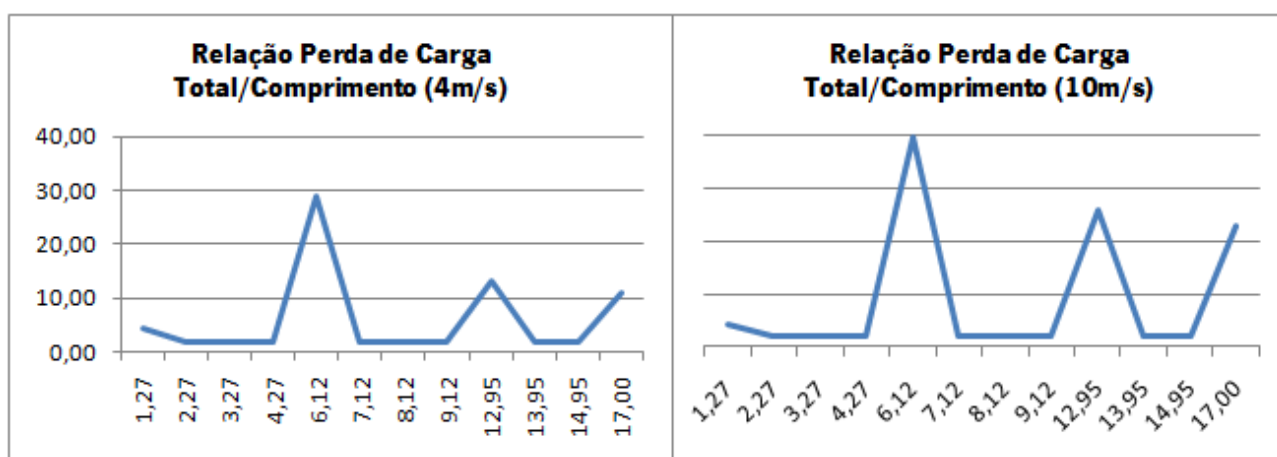


Gráfico 5.9 - Variação das perdas de carga totais pelo método 1

No que concerne ao método 2, tal como já se verificou na comparação do capítulo 4.3.3, ocorrem muitas variações da perda de carga (Gráfico 5.10) porque os acidentes estão mais distribuídos pelas secções, que são em maior quantidade. As perdas de carga totais neste método são sempre inferiores ao método 1.

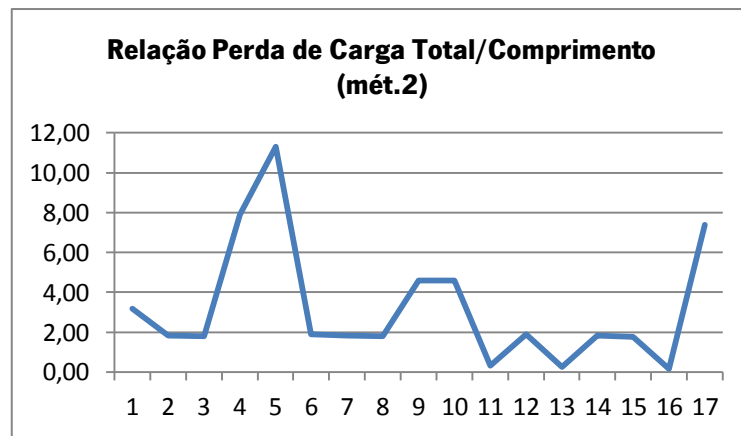


Gráfico 5.10 - Variação da perda de carga total no método 2

5.3.6. Comparação com os valores medidos na instalação real

Para comparação dos diferentes métodos de dimensionamento, a utilização do tubo de pitot-total é útil de forma a determinar a pressão total e estática e, conseqüentemente, a pressão dinâmica.

O tubo de pitot-total consiste num tubo orientado na direcção do escoamento com uma abertura na ponta, sendo essa a tomada de pressão total. Perpendicularmente a este tem mais dois orifícios que funcionam como uma tomada de pressão estática (Figura 5.6 – Ponto 1). O fundamento teórico no qual se baseia este tipo de medição prende-se com a linha de corrente de estagnação que é formada pela colocação de um objecto fixo no escoamento e que cria esta linha de separação do escoamento. Esta linha inicia-se no ponto de estagnação, que neste caso é na ponta aberta do tubo de pitot-total (Figura 5.6 – Ponto 2). Nessa zona a velocidade é nula, logo considerando a diferença de cota nula, então a pressão total em 2 pode ser expressa pela equação 24.

$$p_2 = p_1 + \frac{1}{2} \rho U_1^2 \quad (24)$$

A diferença de pressão h (Figura 5.6) é o valor da pressão dinâmica pois é a diferença entre a pressão total e a pressão estática. Para determinar a pressão estática retira-se o tubo de pitot-estático, deixando apenas ficar o tubo de ligação à tomada de pressão estática. Contudo, para determinar apenas a pressão total faz-se o inverso e quando se pretender a pressão dinâmica, então, ficam os dois tubos ligados para determinar o h .

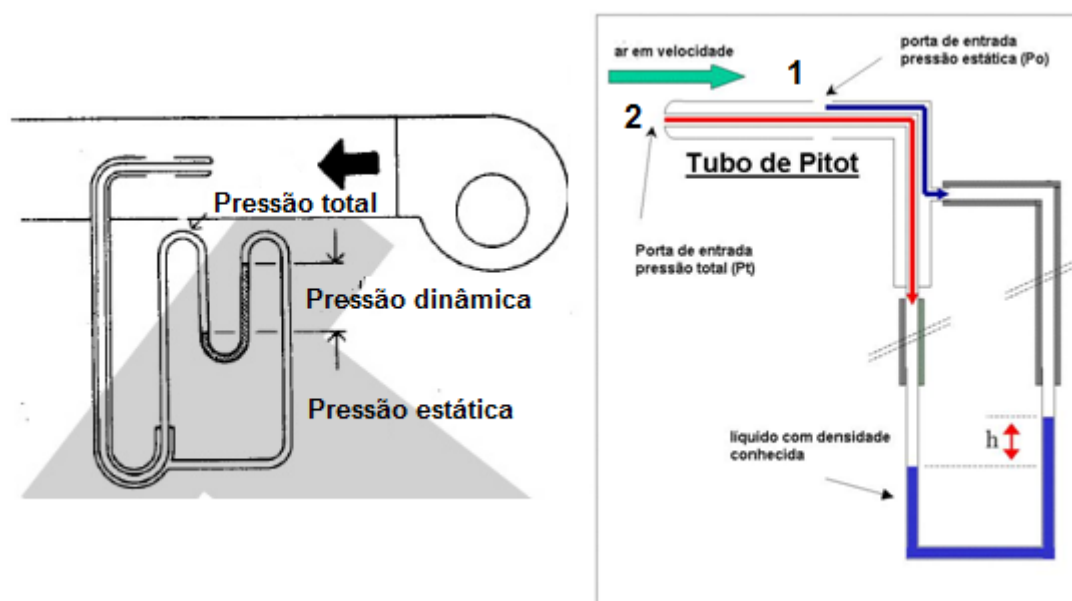


Figura 5.6 - Tubo de pitot-estático [7]

Através dos valores obtidos de pressão dinâmica, comparou-se os mesmos com os resultados (dimensões da conduta iguais à instalação real) do programa. Na Tabela 5.14, verifica-se que os resultados obtidos pelo método 1, apresentam valores um pouco mais próximos dos reais, até porque a instalação foi dimensionada pelo método de redução da velocidade, o que explica valores mais semelhantes.

Tabela 5.14 - Valores obtidos na instalação real e no método 1

Secção	Pd.Real (Pa)	Pd.Real (m)	Vel.Real (m/s)	Pd.Mét.1 (m)	Vel.Mét1 (m)	Dif Pd	Dif Vel
1	58	4,91	9,83	7,16	11,85	2,25	2,02
5	41	3,47	8,27	4,19	9,76	0,72	1,49
10	21	1,78	5,92	2,4	6,86	0,62	0,94
12	13	1,10	4,65	1,35	5,15	0,25	0,5
Ramal esq. 1	6,5	0,55	3,29	2,45	5,13	1,90	1,84
Ramal esq.3	3	0,25	2,24	0,28	1,74	0,03	0,5
Ramal dir 1	13	1,10	4,65	2,45	5,13	1,35	0,48
Ramal dir 3	2,5	0,21	2,04	0,28	1,74	0,07	0,3

Contudo, na Tabela 5.15, os valores apresentam-se um pouco mais distantes dos obtidos experimentalmente. Em alguns pontos a diferença de pressão dinâmica é de 2 m/s, mas em outros é inferior a 1m/s.

Tabela 5.15 - Valores obtidos na instalação real e no método 2

Secção	Pd.Real (Pa)	Pd.Real (m)	Vel.Real (m/s)	Pd.Mét.1 (m)	Vel.Mét1 (m)	Dif Pd	Dif Vel
1	58	4,91	9,83	7,16	11,85	2,25	2,02
4	41	3,47	8,27	4,85	9,76	1,38	1,49
10	21	1,78	5,92	3,04	7,72	1,26	1,8
16	13	1,10	4,65	1,35	5,15	0,25	0,5
Ramal esq. 1	6,5	0,55	3,29	2,45	5,13	1,90	1,84
Ramal esq.3	3	0,25	2,24	0,28	1,74	0,03	0,5
Ramal dir 1	13	1,10	4,65	2,45	5,13	1,35	0,48
Ramal dir 3	2,5	0,21	2,04	0,28	1,74	0,07	0,3

Estas diferenças entre o prático e o teórico podem dever-se às seguintes razões:

1. Medições no local mal efectuadas devido à posição do tubo de pitot. A posição da frente do tubo deveria ser paralela ao escoamento, contudo, ângulos superiores a 5° podem alterar bastante os resultados;
2. Devido à existência de acidentes geométricos, por vezes o perfil de velocidades é alterado, ou seja, a colocação do tubo de pitot pode não ter sido a mais correcta;
3. Erro associado ao tubo de pitot, já bastante antigo;
4. A potência determinada deu superior à real. Na instalação denotou-se que nas grelhas finais a velocidade à saída era inferior às outras. A velocidade requerida nas grelhas varia entre 2 a 3m/s. Esta diferença de valores pode ser relativa à reduzida potência do ventilador, que deveria ser suficiente para que nestas grelhas a velocidade fosse superior. Uma forma de verificar seria medir o caudal de saída das grelhas, contudo, não foi possível obter um medidor de caudal (tipo “saco”) com poucos erros.

5.3.7. Comparação geral entre métodos

Ao longo das comparações efectuadas verificou-se que os métodos apresentam algumas vantagens e desvantagens, um em relação ao outro. Pode-se salientar as seguintes:

- a) O método 2 permite obter diâmetros da conduta menores que o método 1, quando neste se delimita a velocidade para valores de velocidade de escoamento do ar baixos e potência de ventilador mais baixa;

- b) Para delimitações (cerca de 8 m/s) superiores no método 1, ocorre o inverso, obtendo-se diâmetros de conduta menores que no método 2, contudo potência do ventilador mais elevada;
- c) A perda de carga total no método 2 é sempre inferior à obtida no método 1, inclusive a potência do ventilador necessária (Gráfico 5.11);

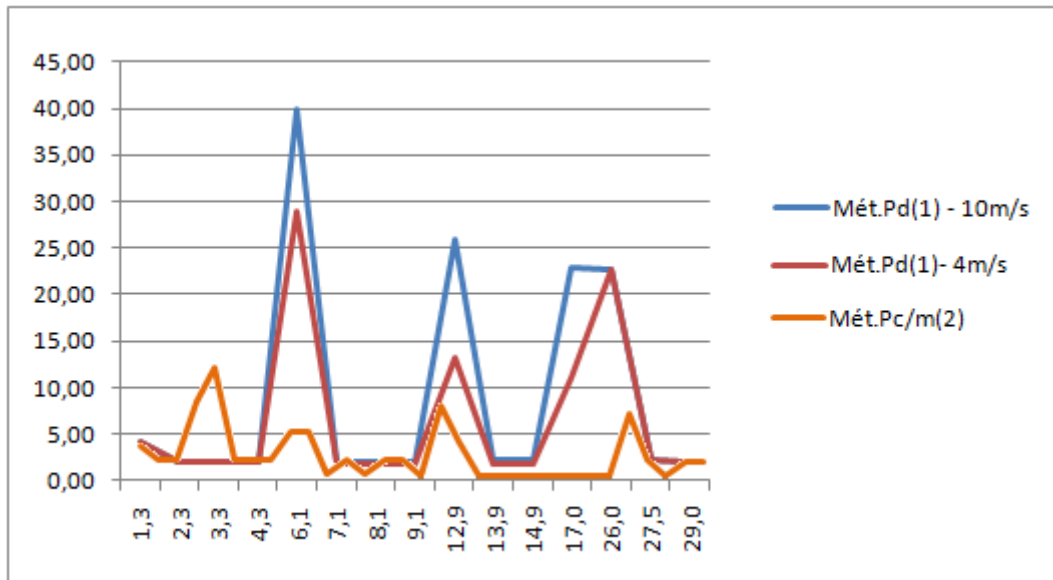


Gráfico 5.11 - Perda de carga total através dos métodos

6. Conclusão

O objectivo deste trabalho consistiu em obter resultados mais exactos do ponto de vista teórico, considerando todas as perdas de carga inerentes a uma rede aeráulica.

A opção de escolha entre diferentes métodos de dimensionamento, promove a eficiência do cálculo porque um método pode apresentar maiores vantagens do que outro dependendo da aplicação pretendida. Denotou-se que para casos em que o ruído não é problema, como casos industriais, o método 1 associado com a delimitação da redução da velocidade num ponto alto é o método mais adequado. Nos casos em que a velocidade de escoamento de ar deve ser baixa devido aos problemas de propagação sonora, o método 1 com uma delimitação de velocidade baixa adequa-se melhor. Contudo, o método 2, apresenta melhores resultados perante a maioria das aplicações. Permite não só a obtenção de dimensões de condutas semelhantes ao método 1 para delimitações de velocidade baixas, mas também a obtenção de ventiladores de potência mais baixa, contudo, é necessária a utilização de componentes para equilíbrio do sistema.

A utilização da base de dados dos coeficientes de perda de cargas localizadas da SMACNA permitiu um acesso e cálculo muito facilitado das mesmas, que permitiram uma maior aproximação das perdas totais ao valor real, sem aplicação de coeficientes de segurança.

6.1. Possíveis aplicações de cada método

A partir de todas as comparações efectuadas a nível de vários parâmetros, como a pressão dinâmica, perdas de carga distribuídas e localizadas, potência de ventilador e necessidade de equilíbrio do sistema recorrendo a *dampers*, pode-se enunciar diversos tipos de aplicações pelas quais se deve optar pelo método de redução de velocidade com posterior pressão dinâmica constante (Método 1) ou pelo método de perda de carga distribuída constante (Método 2).

Relativamente ao método 1, verificou-se que a introdução de um limite de redução de velocidade influencia o dimensionamento da instalação. Este método pode ser aplicado a diversas aplicações:

- a) Para delimitações de velocidade elevadas, como no exemplo apresentado de 10m/s, estes valores normalmente não são aceitáveis para diversas aplicações devido ao ruído provocado, contudo, para aplicação industriais em que há o normal ruído das máquinas, este será o melhor método para utilizar, contudo deverá ser efectuada uma comparação de preços de

instalação e manutenção, já que o ventilador terá de ter potência mais elevada. Apesar de se utilizar um ventilador maior, as condutas serão de dimensões mais reduzidas.

- b) Para delimitações de velocidades reduzidas (como o exemplificado, 4m/s), pode-se utilizar o método 1 para aplicações em que o factor som é extremamente importante, como por exemplo, hotéis, hospitais, auditórios e residências. Verificou-se que a velocidade do ar é menor do que no método de perda de carga, contudo, a potência do ventilador terá de ser um pouco mais elevada, e o preço nas condutas será maior.
- c) A utilização do método 2 abrange muito mais aplicações. De facto, é aquele que determina uma potência de ventilador necessária mais baixa, já que as perdas de carga totais são menores. Como aplicações, deverá ser utilizado para pequenas/médias instalações, velocidades de escoamento do ar intermédias para aplicações em ginásios, bibliotecas, bancos, restaurantes, comércio e oficinas.

6.2. Propostas de trabalho futuro

Ao longo da realização deste trabalho surgiram diversas ideias para implementação na ferramenta de cálculo, contudo, não eram alvo de objectivo inicial. Assim, entre as quais, se destacam:

1. Acesso a uma base de dados dos componentes das empresas através das informações dadas pelos fornecedores, e implementação dessa base de dados na ferramenta de cálculo;
2. Utilização de outro método de dimensionamento designado por método de recuperação estática, que melhor se adequa para o equilíbrio de pressões. É útil para grandes instalações do tipo de centros comerciais ou hipermercados, em que o número de grelhas é elevado e se pretende nas mesmas o mesmo caudal e velocidade;
3. Criação de um cálculo de insuflação de ar novo a partir do RSECE.

7. Referências bibliográficas

1. **Lobarinhas, P.** *"Apostamentos de Mecânica dos Fluidos"*, Universidade do Minho, 2008.
2. **Nunes, A.** *"Ventilação Industrial"*, Universidade do Minho.
3. **White, F. M.** *"Fluid Mechanics"*, McGraw-Hill, 1998.
4. **Çengel Y.A., Cimbala, J.M.** *"Mecânica dos FLuidos - Fundamentos e Aplicações"*, McGraw Hill, 2007.
5. **Zmrhal V., Schwarzer J.** *"Numerical simulation of local loss coefficients of ventilation duct fittings"*, 2009.
6. **Wang, S. K.** *"Handbook of air-conditioning and refrigeration"*, McGraw-Hill, 2000.
7. **Contimetra**, último acesso: 30/11/2011, em:
<http://www.contimetra.com/Paginas/Comuns/catalogos/Catalogos.aspx>.
8. **France-Air**, último acesso: 29/11/2011, em:
<http://www.france-air.com/pt/Default.aspx?tabid=507&idcha=B>.
9. **ASHRAE.** *"HVAC Systems and Equipment"*, ASHRAE, 2008.
10. **Chaves, F.** *"Instalações de Climatização e Refrigeração"*, Universidade Superior de Tecnologia de Abrantes, 2009.
11. **Kharagpur.** *"Design Of Air Conditioning Ducts"*, 2005.
12. **Gan G., Riffat S.B.** *"Numerical Determination of Energy Losses at Duct Junctions"*, 2000.
13. **SMACNA.** *"HVAC Systems Duct Design"*, SMACNA, 2006.

8. Bibliografia

Nunes, A. *"Ventilação Industrial"*, Universidade do Minho

White, F. M. *"Fluid Mechanics"*, McGraw-Hill, 1998.

Çengel Y.A., Cimbala, J.M. *"Mecânica dos FLuidos - Fundamentos e Aplicações"*, McGraw Hill, 2007.

ASHRAE. *"ASHRAE Handbock Fundamentals"*, 2009.

Merzkirch, W. *"Fluid Mechanics of Flow Metering"*, Springer, 2004.

Loureiro, H. *"Excel macros & VBA"*, Lisboa, FCA - Editora de Informática, 2005

Campos, L. *"Programação em Visual Basic 6"* Lisboa - FCA - Editora de Informática, 1998

NPTEL, último acesso: 23/10/2011, em: <http://www.nptel.iitm.ac.in/>

France-Air, último acesso: 29/11/2011, em: http://www.solerpalau.pt/formacion_01_01.html

SMACNA, último acesso: 11/11/2011, em <http://www.smacna.org/>

Visual Basic, último acesso: 09/10/2011, em <http://office.microsoft.com/en-us/excel-help/find-help-on-using-the-visual-basic-editor-HA010173655.aspx>

ANEXOS

Anexo A – Folha de cálculo do Método 1

Dimensionamento de condutas aerúlicas - Método redução de velocidade com posterior pressão dinâmica constante

Dados restrições - Dimensionamento da linha		Seleção de Grelhas/Difusores	
Caudal de insuflação/extracção	<input type="text"/> m ³ /h	Grelhas	
Velocidade limite na linha	<input type="text"/> m/s	Caudal total neste tipo de gre	
Delimitação da redução de v	<input type="text"/> m/s	Velocidade requerida nas gre	
Resultados úteis		Nº de grelhas	
Área de passagem	<input type="text"/> m ²	Secção da grelha selecciona	
Diâmetro inicial sugerido	<input type="text"/> m	Área de grelhas	
Propriedades do ar		Área efectiva de cada grelha	
Temperatura (T)	<input type="text"/> °C	Velocidade efectiva de cada	
Massa volúmica (ρ)	<input type="text"/> kg/m ³	Caudal por grelha	
Viscosidade dinâmica (μ)	<input type="text"/> kg/m.s	Perda de carga (dada pelo fo	
Material da Conduta		Nº Lista de grelhas	
Rugosidade (ε)	<input type="text"/> m	Qtd. aual (m ³ /s)	
Adicionar Ramais (Pode também adicionar na folha da conduta princip		ΔH (m)	
Adicionar ramais secundário	Adicionar Ramais	Difusores	
Aceder ao Ramal Principal	Conduta principal	Caudal total neste tipo de dif	
		Nº de difusores	
		Caudal por difusor	
		Perda de carga (dada pelo fo	
		L Lista de difusores	
		Qtd. aual (m ³ /s)	
		ΔH (Pa)	

Figura A1 - Dados da instalação no método 1

Dimensionamento de condutas aerúlicas - Método redução de velocidade com posterior pressão dinâmica constante

Adicionar/Eliminar secções ao ramal principal		Botões de acesso (base de dados)		Botões de criação de gráficos de resultados úteis à análise de	
Adicionar secções no ram	<input type="text"/>	Perdas de Carga Localizadas	Dados Iniciais	Perda de carga total / Comprimento	Pressão dinâmica / Comprimento
Eliminar secções	<input type="text"/>	Adicionar Ramais		Gráfico Pd/L	Gráfico Pd/L
Perda de carga total do ramal				Perda de carga distribuída / Comprimento	Localizadas vs Pc Distribuída
<input type="text"/> m.c.ar				Gráfico Pd/L	Gráfico Pd vs PcD

Seção Rectangular		Seção Circular		Velocidade		Pressão		Perdas de Carga											
Seção	Nº ou L	A (mm)	B (mm)	D.Eq (mm)	Diâmetro sugerido	Velocidade	Velocidade	Pd Sugerido	Pd real (m)	Comprimento	Reynolds	Factor de atrito	Pc Distribuída	Pc Localizada	Outras Pc L	Pc Loc.	Pc L Total	Pc Total	Soma dos comprimentos
1						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		0,00	#DIV/0!	#DIV/0!	0
2						#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		0,00	#DIV/0!	#DIV/0!	0

Figura A2 - Dimensionamento da Conduta Principal pelo método 1

Anexo B – Folha de cálculo do Método 2

Dimensionamento de condutas aerólicas - Método perda de carga distribuída por metro constante

Dados restrições - Dimensionamento da linha

Caudal de insuflação/extracão: m³/h

Velocidade limite na linha: m/s

Perda de carga/metro do projeto: m.c.m

NOTA: Perda de projeto é calculada na 1ª seção

Resultados úteis

Área de passagem: m²

Diâmetro inicial sugerido: m

Propriedades do ar

Temperatura (T): °C

Massa volúmica (ρ): kg/m³

Viscosidade dinâmica (μ): kg/m.s

Viscosidade cinemática (ν): kg/m.s

Material da Conduta

Rugosidade (ε): m

Adicionar Ramais (Pode também adicionar na folha de conduta principal)

Adicionar ramais secundários:

Aceder ao Ramal Principal:

Seleção de Grelhas/Difusores

☒ Grelhas

Caudal total neste tipo de grelha: m³/h

Velocidade requerida nas grelhas: m/s

Nº de grelhas: qtd.

Seção da grelha seleccionada: A B

Área de grelhas: m²

Área efectiva de cada grelha: m²

Velocidade efectiva de cada grelha: m/s

Caudal por grelha: m³/s

Perda de carga (dada pelo fabricante): Pa

Nº Lista de grelhas

Nº	Lista de grelhas	Qtd.	caudal (m³/s)	ΔH (m)
1				
2				
3				
4				

☒ Difusores

Caudal total neste tipo de difusor: m³/h

Nº de difusores: qtd.

Caudal por difusor: m³/s

Perda de carga (dada pelo fabricante): Pa

L Lista de difusores

L	Lista de difusores	Qtd.	caudal (m³/s)	ΔH (Pa)
A				
B				
C				
D				
E				

Figura B1 - Dados da instalação no método 2

Dimensionamento de condutas aerólicas - Método perda de carga distribuída por metro constante

Perda de carga por metro do projeto

Perda de carga/metro do projeto: m.c.m

Perda de carga/metro do projeto: m.c.m

Perda de carga total do ramal

Perda de carga do ramal: m.c.m

Botões de acesso (base de dados)

Adicionar secções ao ramal principal

Botões de criação de gráficos de resultados úteis à análise do sistema

☒ Seção Rectangular

Rectangular	Circular
A (mm)	Diâmetro (mm)
B (mm)	Diâmetro sugerido
D.Eq (mm)	

☐ Seção Circular

Rectangular	Circular
A (mm)	Diâmetro (mm)
B (mm)	Diâmetro sugerido
D.Eq (mm)	

Seção	Nº ou L	Caudal por	Caudal (m³/s)
1		0,0000	0,00
2		0,0000	0,00

Velocidade	Velocidade	Pd (m)
Superfície	Superfície	Pd real (m)
#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!

Perdas de Carga									
Pd/m (distribuído)	Reynolds	Fator de atrito (f)	Coefficiente	Pe Localizada	Outras Pe L	Pe Loc. Grelha/Dif.	Pe Loc. Total	Pe Total	Soma dos comprimentos
#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!	1
#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!	2

Figura B2 - Dimensionamento da Conduta Principal pelo método 2

Dimensionamento de condutas aerúlicas – Método perda de carga distribuída por metro constante

Dados, restrições – Dimensionamento do ramal

Caudal ao ramal: m³/s

Velocidade limite ao ramal: m/s

Perda de carga/metro do projecto: #DIV/0!

Perda de carga total do ramal:

Perda de carga do ramal: #DIV/0! m.c.a.r

Adicionar secções ao ramal principal:

Eliminar secções:

Seleção da derivação (forquilha)

para escolher as R_{eq} ou R_{eq} , dependendo se quer ramal ou sub-ramal

☐ Convergente ☐ Divergente

Caudal: m³/s

Q_p :

Q_a :

Q_b :

Botões de acesso (base de dados):

Perdas de Carga Localizadas:

Dados Iniciais:

Conduta Principal:

Botões de criação de gráficos de resultados feitos à análise do sistema

Perda de carga total / Comprimento:

Perda de carga distribuída / Comprimento:

Pressão dinâmica / Comprimento:

Localizadas vs Pc Distribuída:

Seção Rectangular: ☐ Seção Circular: ☐

Seção	Nº ou L	Caudal por Grella/Dif. (m³/s)	Caudal (m³/s)
1		0,0000	0,00
2		0,0000	0,00

Rectangular		Circular	
A (mm)	B (mm)	r (mm)	Diâmetro sugerido
			#DIV/0!
			#DIV/0!

Velocidade de	Pd (m)
#DIV/0!	#DIV/0!
#DIV/0!	#DIV/0!
#DIV/0!	#DIV/0!

Perdas de Carga										Soma dos
Pcd/m (distribuída)	Reynolds	factor de atrito	coeficiente	Pc Localizada	Outras Pc L	Pc Loc. Grell/Dif.	Pc Loc Total	Pc Total	Pd Total	
#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		0,00	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1
#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		0,00	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	2

Figura B3 - Dimensionamento dos ramos secundários pelo método 2

Dimensionamento de condutas aerúlicas – Método perda de carga distribuída por metro constante

Resultados - Perda de Carga Total da Instalação

Nº	Descrição do Ramal	ΔH (m)	Eq. pressão
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			

Perda de Carga Total Máxima (+ Eq. dependente) **0,00**

Perdas de carga de equipamentos não consideradas no dimensionamento dos ramais

NOTA: Ex-Fillman

Nº	Descrição do equipamento	Qtd	ΔH (Pa)	ΔH (m)
1				0
2				0
3				0
4				0
5				0

Botões de acesso:

Adicionar conjunto de ramais:

Dados da Instalação:

Conduta principal:

Seleção do Ventilador

Caudal na instalação: 0 m³/s

Pressão estática: 0,00 Pa

Curva da Instalação:

Curva do Ventilador:

k_v inicial: #DIV/0!

k_v corrigido: #DIV/0!

Pontos para desenho gráfico		Pontos para desenho gráfico	
Q (m³/s)	ΔH (m)	Q (m³/s)	Vent.1
Inicial	corrigido	Pc(m)	Vent.2
		Pc(m)	
	#DIV/0!	#DIV/0!	
	#DIV/0!	#DIV/0!	
	#DIV/0!	#DIV/0!	
	#DIV/0!	#DIV/0!	
	#DIV/0!	#DIV/0!	
	#DIV/0!	#DIV/0!	
	#DIV/0!	#DIV/0!	
	#DIV/0!	#DIV/0!	
	#DIV/0!	#DIV/0!	
	#DIV/0!	#DIV/0!	

Potência Teórica: #DIV/0! W

Rendimento do Vent: %

Potência Vent. Selec: kW

Ventilador Seleccionado:

Ruído dB

Pressão estática do ventilador: Pa

Perda adicionada (regulagem): Pa

Perda Total: 0,00 Pa

Verificação da pressão: 0,00 Pa

Gráfico de Resultados

Pressão estática (Pa) vs Caudal (m³/s)

Curva de Instalação Inicial:

Curva do Ventilador 1:

Curva do Ventilador 2:

Curva Instal. Com.:

Ponto Profundidade:

Ponto Ponto:

Figura B4 - Resultados obtidos pelo método 2

Anexo C – Fluxograma do método 1 e do método 2

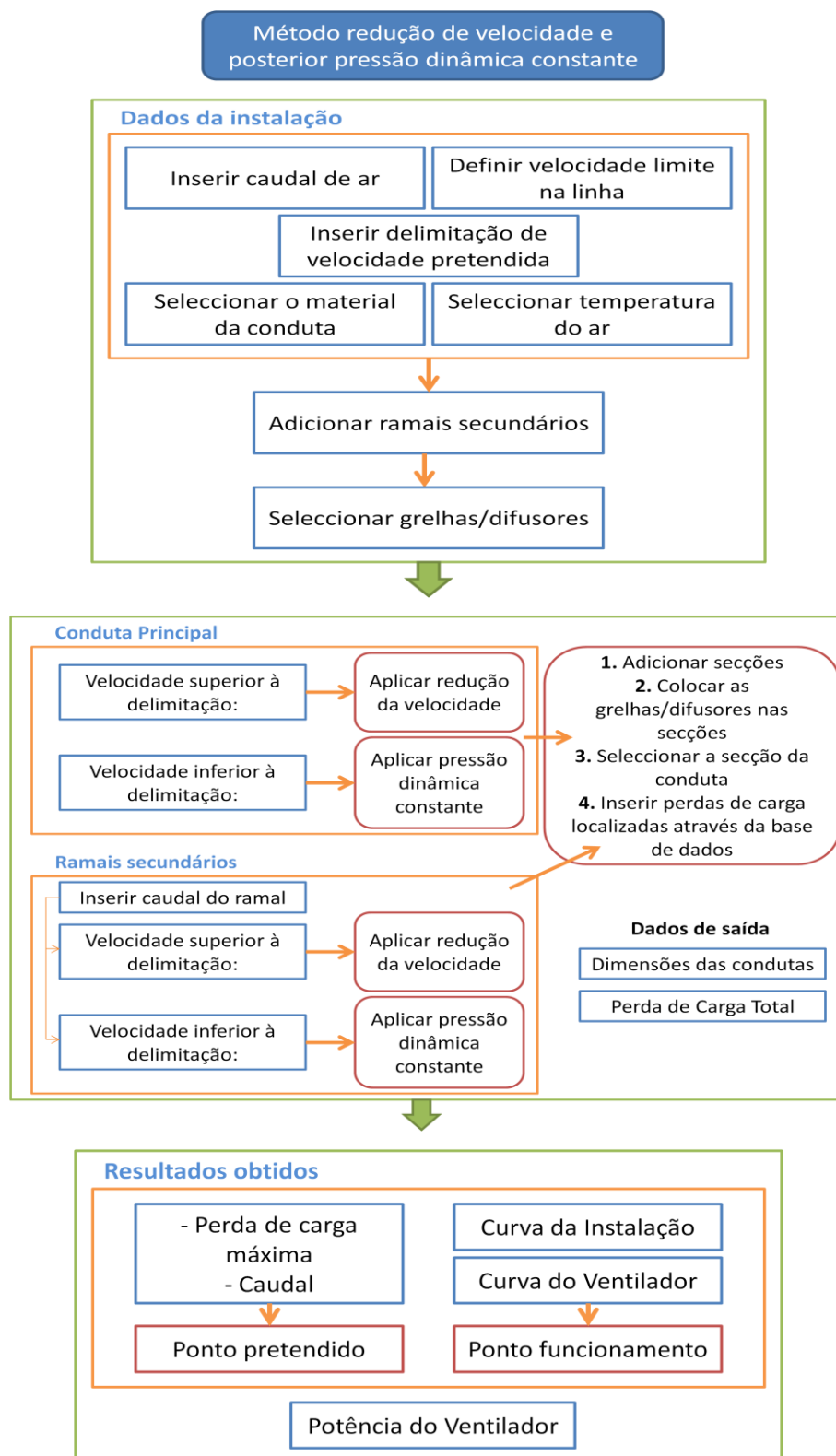


Figura C1 - Fluxograma do método 1

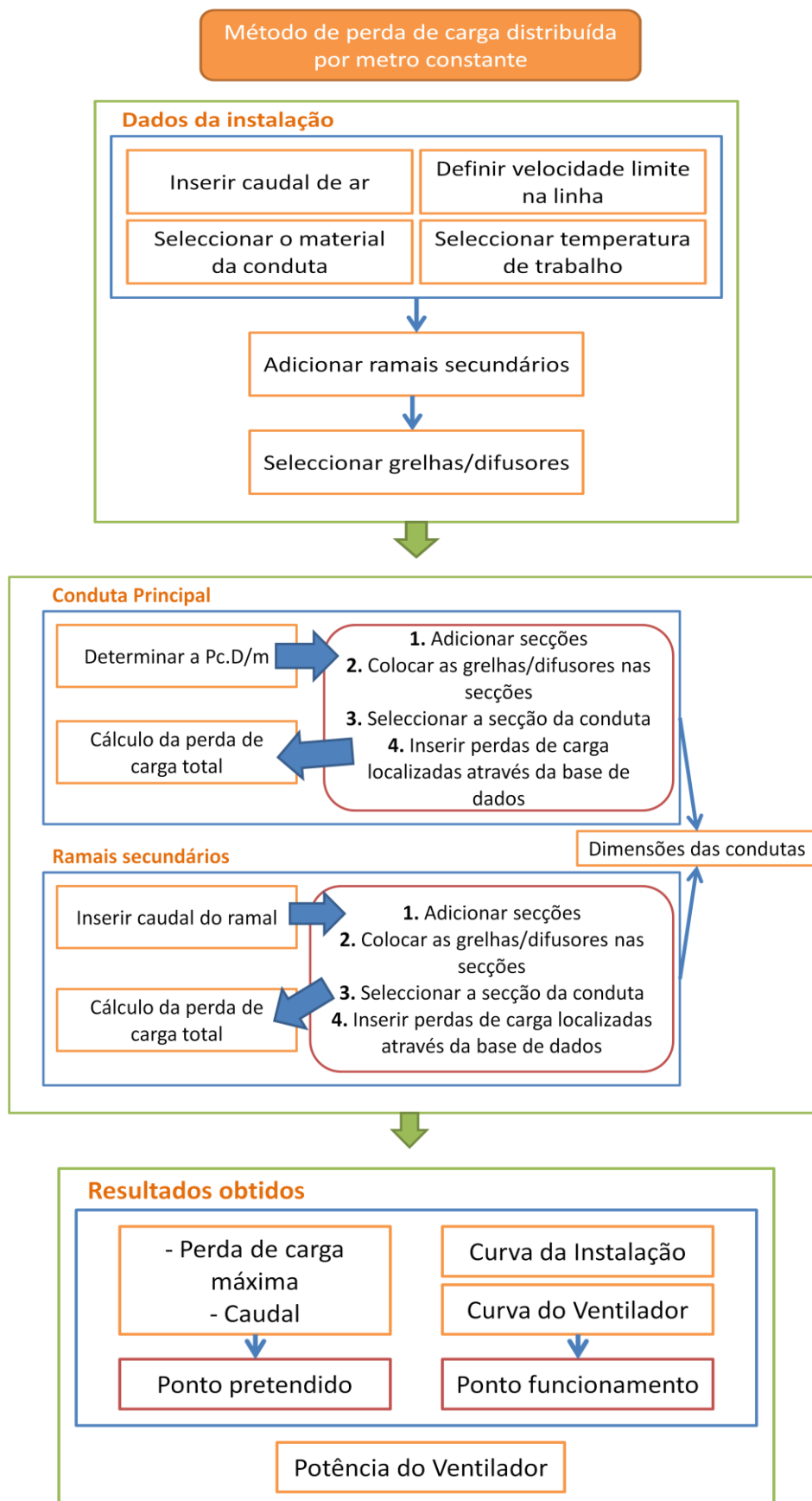


Figura C2 - Fluxograma do método 2